

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA DE LA ESCUELA  
SUPERIOR DE INGENIEROS DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA

BORRADOR FINAL

TESIS DOCTORAL

**AHORRO ENERGÉTICO EN EDIFICIOS  
MEDIANTE EL ALMACENAMIENTO  
ESTRUCTURAL CON MATERIALES DE  
CAMBIO DE FASE**

José Antonio Tenorio Ríos  
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

---

Directores:  
Servando Álvarez Domínguez  
Dr. Ingeniero Industrial  
José Manuel Salmerón Lisén  
Dr. Ingeniero Industrial

2014





# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>Abstract</b>	<b>IX</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XVII</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XX</b>
<b>1. Introducción, antecedentes y objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	7
1.3. Objetivos . . . . .	9
1.4. Valoración inicial . . . . .	10
<b>2. Metodología</b>	<b>13</b>
2.1. Hipótesis . . . . .	13
2.2. Plan de trabajo . . . . .	14
2.2.1. Investigación del estado del arte . . . . .	15
2.2.2. Desarrollo y utilización de modelos simplificados . . . . .	15
2.2.3. Calibración del modelo mediante ensayos experimentales . . . . .	15
2.2.4. Desarrollo de Indicadores de Eficiencia Energética . . . . .	16
2.2.5. Estudio de la integración de PCMs en la edificación . . . . .	16
2.2.6. Estudio de viabilidad de soluciones . . . . .	17
2.2.7. Establecimiento de conclusiones . . . . .	17
<b>3. Estado del Arte</b>	<b>19</b>
3.1. Introducción . . . . .	19
3.2. Almacenamiento de energía térmica . . . . .	20
3.2.1. Definición de almacenamiento de energía . . . . .	20
3.2.2. Calor sensible vs. calor latente . . . . .	22
3.2.3. Materiales de cambio de fase . . . . .	23
3.2.3.1. Requisitos . . . . .	23

3.2.3.2.	Clasificación . . . . .	24
3.2.3.3.	Propiedades termofísicas . . . . .	26
3.2.3.4.	Estabilidad . . . . .	28
3.2.3.5.	Corrosión . . . . .	28
3.2.3.6.	Comportamiento ante el fuego . . . . .	29
3.2.3.7.	Productos comerciales de aplicación en edificación . . . . .	31
3.2.3.8.	Determinación experimental de las propiedades mediante ensayos . . . . .	34
3.3.	Utilización de materiales de cambio de fase en edificación . . .	34
3.3.1.	Introducción . . . . .	35
3.3.2.	Integración de PCM en los sistemas de climatización .	36
3.3.2.1.	Ventilación nocturna con PCM . . . . .	36
3.3.2.2.	Calefacción/Refrigeración por suelo radiante y PCM . . . . .	37
3.3.3.	Integración de PCM en el edificio . . . . .	38
3.3.3.1.	Enlucidos impregnados con PCM . . . . .	40
3.3.3.2.	Hormigón con PCM . . . . .	42
3.3.3.3.	Tablero de Madera-cemento con PCM . . . . .	43
3.3.3.4.	Panel sándwich con PCM . . . . .	44
3.3.3.5.	Ladrillos con PCM . . . . .	44
3.3.3.6.	Ventanas con PCM . . . . .	45
3.3.3.7.	Cubiertas con PCM . . . . .	46
3.3.3.8.	Muros con PCM . . . . .	47
3.3.3.9.	Muro Trombe con PCM . . . . .	47
3.3.3.10.	Fachadas ventiladas con PCM . . . . .	49
3.3.3.11.	Suelos con PCM . . . . .	50
3.3.4.	Métodos de integración de PCMs . . . . .	50
3.3.4.1.	Directa . . . . .	50
3.3.4.2.	Encapsulado . . . . .	51
3.4.	Simulación y métodos de cálculo . . . . .	55
3.5.	Patentes relacionadas con PCMs aplicables a la edificación . .	57
<b>4.</b>	<b>Modelos de cálculo</b>	<b>61</b>
4.1.	Desarrollo y utilización de modelos . . . . .	61
4.2.	Modelos detallados. Métodos numéricos . . . . .	63
4.2.1.	Simulación de fachadas con PCM . . . . .	65
4.2.1.1.	Modelo de simulación de las aletas con material de cambio de fase y elementos interior y exterior . . . . .	67

4.2.1.2.	Modelo de simulación de las temperaturas del aire en la cámara . . . . .	67
4.2.1.3.	Modelo de simulación del intercambio de ca- lor por radiación entre las aletas y el muro interior y exterior . . . . .	70
4.2.1.4.	Acoplamiento de elementos . . . . .	72
4.2.2.	Simulación de forjados con PCM . . . . .	74
4.2.2.1.	Modelo de simulación de las temperaturas del aire en la cámara . . . . .	76
4.2.2.2.	Modelo de simulación del forjado con el espa- cio superior e inferior y la cámara . . . . .	78
4.3.	Modelos simplificados nivel 1 . . . . .	79
4.3.1.	Modelo simplificado nivel 1. Fachada con PCM . . . . .	80
4.3.1.1.	Resolución de las capacidades del modelo . . . . .	84
4.3.1.2.	Resolución de las temperaturas del modelo . . . . .	86
4.3.1.3.	Cálculo de la temperatura del aire en la cámara . . . . .	92
4.3.2.	Modelo simplificado nivel 1. Forjado con PCM . . . . .	93
4.3.2.1.	Planteamiento del modelo . . . . .	93
4.4.	Análisis del modelo nivel 1 de fachada . . . . .	101
4.4.1.	Análisis de las variables del modelo . . . . .	102
4.4.1.1.	Variables básicas . . . . .	102
4.4.1.2.	Variables climáticas y de temperatura . . . . .	103
4.4.1.3.	Coeficientes convectivos y radiantes . . . . .	105
4.4.2.	Funcionamiento de la cámara . . . . .	110
4.4.2.1.	Control horario . . . . .	110
4.4.2.2.	Control horario con condiciones adicionales . . . . .	110
4.4.2.3.	Carga invernal . . . . .	111
4.4.2.4.	Sobrecalentamiento . . . . .	111
4.5.	Ensayos experimentales . . . . .	111
4.6.	Calibración del modelo simplificado nivel 1 de fachada . . . . .	112
4.7.	Modelos simplificados nivel 2 . . . . .	126
4.7.1.	Intercambiadores regenerativos . . . . .	127
<b>5.</b>	<b>Indicadores de evaluación de la eficiencia</b>	<b>139</b>
5.1.	Definición de indicadores . . . . .	139
5.1.1.	Indicadores de Eficiencia Global . . . . .	140
5.1.1.1.	Eficiencia Global del sistema acoplado al Edi- ficio . . . . .	140
5.1.1.2.	Eficiencia Global del sistema de Fachada . . . . .	140
5.1.1.3.	Factor de acoplamiento . . . . .	142
5.1.2.	Indicadores parciales . . . . .	143

5.1.2.1.	Factor de ventilación . . . . .	143
5.1.2.2.	Factor del efecto cámara . . . . .	144
5.1.2.3.	Factor de instalación . . . . .	147
5.1.2.4.	Factor de diseño . . . . .	148
5.1.3.	Relación entre indicadores . . . . .	148
5.2.	Cálculo de indicadores . . . . .	149
5.2.1.	Indicadores de Eficiencia Global . . . . .	149
5.2.2.	Indicadores parciales . . . . .	150
5.3.	Dependencia formal y funcional . . . . .	153
5.3.1.	Dependencia formal . . . . .	154
5.3.2.	Dependencia funcional . . . . .	159
5.3.2.1.	Variables $\Lambda$ y $\Pi$ . . . . .	159
5.3.2.2.	Fachada como intercambiador regenerativo . .	161
5.3.2.3.	Indicadores de eficiencia . . . . .	168
5.4.	Utilización como herramienta de prediseño . . . . .	178
<b>6.</b>	<b>Integración y viabilidad</b>	<b>183</b>
6.1.	Elección de los materiales de cambio de fase . . . . .	184
6.2.	Integración de PCMs en la edificación . . . . .	185
6.2.1.	Requisitos técnicos para la integración estructural . . .	188
6.2.2.	Idoneidad de las soluciones de integración estructural de los PCMs . . . . .	189
6.2.3.	Tipos de integración estructural de los PCMs . . . . .	190
6.2.3.1.	Elementos constructivos recubiertos con PCMs	191
6.2.3.2.	Elementos constructivos con PCM embebido en su interior . . . . .	191
6.2.3.3.	Estabilización térmica mediante cambio de fase	192
6.3.	Integración de PCMs en elementos constructivos. . . . .	193
6.3.1.	Criterios . . . . .	194
6.3.2.	Integración de PCMs en fachadas . . . . .	195
6.3.3.	Integración de PCMs en cubiertas . . . . .	197
6.3.4.	Integración de PCMs en forjados . . . . .	198
6.3.4.1.	Forjados industrializados . . . . .	199
6.3.4.2.	Forjados " in situ " . . . . .	202
6.3.5.	Integración de PCMs en particiones interiores . . . . .	205
6.3.6.	Integración de PCMs en en otros elementos . . . . .	205
6.4.	Viabilidad técnica . . . . .	206
6.4.1.	Viabilidad técnica en fachadas . . . . .	207
6.4.2.	Estudio de casos . . . . .	209
6.4.2.1.	Caso 1. Elemento exterior ligero, elemento in- terior ligero . . . . .	210

6.4.2.2.	Caso 2. Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara . .	210
6.4.2.3.	Caso 3. Elemento exterior ligero, muro interior masivo . . . . .	211
6.4.2.4.	Caso 4. Elemento exterior masivo, elemento interior ligero . . . . .	211
6.4.2.5.	Caso 5. Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara .	212
6.4.2.6.	Caso 6. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara . . . . .	213
6.4.2.7.	Caso 7. Elemento exterior masivo, muro interior masivo . . . . .	213
6.4.2.8.	Caso 8. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo . . . .	213
6.4.3.	Casos año completo . . . . .	214
6.4.3.1.	Carga invernal . . . . .	214
6.4.3.2.	Estudio de tipos de fachada . . . . .	216
6.5.	Viabilidad económica . . . . .	219
<b>7.</b>	<b>Discusión final y conclusiones</b>	<b>227</b>
7.1.	Elección de los materiales de cambio de fase . . . . .	228
7.2.	Integración de PCM en edificación . . . . .	229
7.3.	Eficiencia energética en edificios con soluciones con PCM . . .	230
7.4.	Líneas de investigación . . . . .	234
7.5.	Conclusión final . . . . .	237
	<b>Apéndices</b>	<b>241</b>
<b>A.</b>	<b>Resultados de las simulaciones</b>	<b>243</b>
A.1.	Cálculo de indicadores . . . . .	243
A.2.	Estudio de casos . . . . .	258
A.2.1.	Caso 1. Elemento exterior ligero, elemento interior ligero	258
A.2.2.	Caso 2. Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara . . . . .	264
A.2.3.	Caso 3. Elemento exterior ligero, muro interior masivo	270
A.2.4.	Caso 4. Elemento exterior masivo, elemento interior ligero . . . . .	276
A.2.5.	Caso 5. Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara . . . . .	282

A.2.6. Caso 6. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara . . . . .	288
A.2.7. Caso 7. Elemento exterior masivo, muro interior masivo	294
A.2.8. Caso 8. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo . . . . .	300
<b>B. Climatología</b>	<b>307</b>
B.1. Potencial climático . . . . .	307
B.2. Selección y análisis de climas . . . . .	312
<b>Bibliografía</b>	<b>321</b>

# Resumen

El almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase es una tecnología novedosa que contribuirá decididamente al ahorro energético de los edificios. Si se quiere alcanzar el objetivo de construir edificios de consumo casi nulo no son suficientes las estrategias basadas en el aislamiento y el control de la ventilación e infiltraciones, se debe recurrir a las energías renovables como sustento del bienestar térmico.

La energía renovable es eficiente en sí misma pero no siempre está disponible cuando se requiere. La idea de almacenar energía puede permitir acercar la oferta y la demanda que por naturaleza están desfasadas.

Los materiales de cambio de fase son una tecnología que puede ser competitiva en el acondicionamiento de los edificios. En el caso de España se tiene un gran potencial climático suficiente para hacer viable su uso siempre que se parta de un diseño técnicamente eficiente y que sea económicamente competitivo.

En esta tesis se estudia el almacenamiento estructural de energía mediante elementos de cambio de fase, se analiza el material pero sobre todo la integración en el edificio. Se trata de poder predecir el comportamiento mediante modelos abriendo la posibilidad de la evaluación a través de indicadores.

Si se pretende que el edificio se convierta en un captador, intercambiador y acumulador de energía se requiere que el proyectista tenga herramientas adecuadas para evaluar el funcionamiento de los sistemas. Las herramientas deben ser sencillas y utilizables pero sobre todo se requiere disponer de indicadores de eficiencia que permitan la toma de decisiones acertadas desde la fase de proyecto.

En la tesis se propone un conjunto de estos indicadores que se evalúan a

través de un modelo y se aplican al caso de fachadas ventiladas con PCM en su interior para demostrar la viabilidad del método.

El estudio de integración se realiza en general sobre los distintos sistemas y subsistemas que conforman el edificio y que son susceptibles de incorporar estructuralmente el material de cambio de fase.



# Abstract

Structural storage with phase change materials is a novel technology that will contribute strongly to save energy in buildings. If the objective of Nearly Zero Energy Buildings is to be achieved, the strategies based on insulation and control of ventilation and infiltration are not sufficient therefore we must turn to renewable energy in order to maintain thermal comfort.

Renewable energy in itself is efficient but is not always available when required. The idea of energy storage can balance supply and demand of energy that is, by its very nature, imbalanced.

The use of phase change materials is a new technology which can be competitive in the reconditioning of buildings. Spain has great potential climate conditions, enough to make phase change materials viable but only if the design of the solution is technically efficient and economically competitive.

This thesis studies the structural energy storage by using phase change materials, analysing the material and mostly their integration into the building. The intention is to be able to predict their behaviour through models, opening the possibility of assessment using indicators.

If the objective is that the building becomes a solar collector, heat exchanger and an energy storage system, the designer needs the adequate tools to evaluate the performance of those systems. These tools should be simple and practical but above all, efficiency indicators are needed which will facilitate the correct decisions during the design stage.

Some indicators are proposed in this thesis. Indicators are assessed through a model and applied to the case of ventilated facades with PCM to demonstrate the feasibility of the proposed method.

The study of integration is done on the various systems and subsystems

of the building which are suitable for incorporating phase change materials.

# Índice de figuras

1.1. Distribución del consumo de energía en el sector Edificios y Doméstico en España 2010 (IDAE) . . . . .	3
1.2. Espesor requerido de distintos materiales para obtener la misma capacidad térmica, (Hauer y otros, 2005) . . . . .	7
3.1. Clasificación de materiales de almacenamiento de energía (Abhat, 1983) . . . . .	21
3.2. Clases de materiales que pueden ser utilizados como PCM en función de la temperatura y entalpía de cambio de fase. Gráfico: ZAE Bayern (Mehling y Cabeza, 2008) . . . . .	21
3.3. Clasificación de materiales PCM (Sharma y Sagara, 2005) . . . . .	25
3.4. Comportamiento general de los PCM en términos del calor específico y entalpía. Inorgánicos izquierda-Orgánicos derecha. (Koschenz y Lehmann, 2004) . . . . .	27
3.5. Aplicaciones de PCM en la envolvente edificatoria. (Wang y otros, 2009) . . . . .	39
3.6. Ladrillos con PCM. (Soares y otros, 2013) . . . . .	45
3.7. PCM en persianas. (Sharma y otros, 2009) . . . . .	46
3.8. Métodos de confinamiento utilizados en investigaciones PCM. (Agyenim y otros, 2010) . . . . .	54
4.1. Esquema de uso de modelos (Com. personal Pr. S. Álvarez) . . . . .	62
4.2. Temperatura de cambio de fase según el modelo de la capacidad térmica efectiva . . . . .	64
4.3. Entalpía en el cambio de fase por el método de la entalpía . . . . .	64
4.4. Fachada ventilada con aletas con PCM . . . . .	66
4.5. Modelo de simulación fachada ventilada con aletas con PCM . . . . .	66
4.6. Modelo de simulación fachada. Balance energético en la cámara. . . . .	68
4.7. Esquema cámara de aire con aletas con PCM perpendiculares a los muros . . . . .	71

4.8. Esquema cámara de aire con aletas con PCM formando ángulo con el muro . . . . .	73
4.9. Esquema eléctrico para la simulación de fachada ventilada con aletas con PCM . . . . .	73
4.10. Forjado con PCM . . . . .	75
4.11. Modelo de simulación forjado ventilado con tubos rellenos de PCM . . . . .	75
4.12. Modelo de simulación forjado. Balance energético en los alveolos.	77
4.13. Esquema de simulación de forjado a tres caras . . . . .	78
4.14. Esquema de simulación de forjado a tres caras ante solicitud	79
4.15. Esquema eléctrico equivalente de fachada. Nivel1 . . . . .	81
4.16. Esquema simplificado base . . . . .	85
4.17. Esquema simplificado del elemento exterior . . . . .	86
4.18. Esquema simplificado del elemento exterior y la cámara . . . . .	88
4.19. Esquema simplificado de la cámara . . . . .	89
4.20. Esquema simplificado del muro interior y la cámara . . . . .	90
4.21. Esquema simplificado del muro interior . . . . .	91
4.22. Esquema eléctrico para la simulación de forjado ventilado con PCM . . . . .	94
4.23. Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado primero	95
4.24. Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado segundo	97
4.25. Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado tercero .	97
4.26. Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado final . .	98
4.27. Modelo de calor específico equivalente del PCM en función de la temperatura . . . . .	103
4.28. Coeficiente de calor por convección para cámara ventilada . .	106
4.29. Variación del número de Nusselt y del coeficiente de transferencia convectivo para cámara ventilada . . . . .	107
4.30. Variación del coeficiente de transferencia de calor por convección para cámara ventilada en función de la distancia entre aletas. . . . .	108
4.31. Resultados diarios de los coeficientes de transferencia convectivos de ensayo para dos velocidades . . . . .	109
4.32. Simulación de casos para la obtención del espesor para capacidad del muro interior . . . . .	114
4.33. Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de $h_c$ , valores de ensayo . . . . .	115
4.34. Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de $h_c(1)$ .	116
4.35. Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de $h_c(2)$ .	116
4.36. Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de $h_c(3)$ .	117

4.37. Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de hc, ajuste final . . . . .	118
4.38. Temperatura de salida Tout. Calibración diciembre . . . . .	119
4.39. Temperatura del PCM en la sección 1, inferior. Calibración diciembre . . . . .	120
4.40. Temperatura del PCM en la sección 2, media. Calibración diciembre . . . . .	120
4.41. Temperatura del PCM en la sección 3, superior. Calibración diciembre . . . . .	121
4.42. Simulación de casos para la obtención del espesor para capacidad del muro interior . . . . .	122
4.43. Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de hc, valores de ensayo . . . . .	123
4.44. Temperatura de salida Tout. Calibración noviembre . . . . .	124
4.45. Temperatura del PCM en la sección 1, inferior. Calibración noviembre . . . . .	125
4.46. Temperatura del PCM en la sección 2, media. Calibración noviembre . . . . .	125
4.47. Temperatura del PCM en la sección 3, superior. Calibración noviembre . . . . .	126
4.48. Gráfico esquemático de intercambiador regenerativo ideal . . .	129
4.49. Gráfico esquemático de intercambiador regenerativo con paradas	129
4.50. Gráfico esquemático de intercambiador regenerativo sin paradas dibujadas . . . . .	130
4.51. Gráfico esquemático de fachada como intercambiador . . . . .	130
4.52. Gráfico esquemático de fachada como intercambiador regenerativo . . . . .	131
4.53. Gráfico esquemático de modos de congelación en láminas de PCM . . . . .	133
4.54. Rendimiento teórico de intercambiador regenerativo para valores de $\Pi$ comprendidos entre 0 y 50 . . . . .	135
4.55. Rendimiento teórico de intercambiador regenerativo para valores de $\Pi$ comprendidos entre 0 y 50. Comparación . . . . .	136
4.56. Rendimiento teórico de intercambiador regenerativo para valores de $\Pi$ comprendidos entre 0 y 5 . . . . .	136
5.1. Gráfico esquemático de energías . . . . .	142
5.2. Gráfico esquemático de energía en el proceso de carga . . . . .	145
5.3. Gráfico esquemático de energía en el proceso de cámara parada	145
5.4. Gráfico esquemático de energía en el proceso de descarga . . .	146

5.5. Gráfico ilustrativo de energía en función de la temperatura del PCM para fachada ligera y pesada . . . . .	152
5.6. Valores de $\Lambda$ , $\frac{\Lambda}{\Pi}$ y $\eta$ en función de la velocidad . . . . .	162
5.7. Rendimiento de fachada como intercambiador regenerativo . .	163
5.8. Rendimiento de fachada como intercambiador regenerativo para distintas cantidades de PCM. Carga . . . . .	164
5.9. Rendimiento de fachada como intercambiador regenerativo para distintas cantidades de PCM. Descarga . . . . .	165
5.10. Eficiencia Global de Fachada Rendimiento de fachada $\varepsilon_{GF}$ en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM . . . . .	165
5.11. Eficiencia Global de Fachada Rendimiento de fachada $\varepsilon_{GF}$ en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM. 2 . . . . .	166
5.12. Eficiencia Global de Fachada Rendimiento de fachada $\varepsilon_{GF}$ en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM. 3 . . . . .	166
5.13. Variación del parámetro $\Pi_{Carga}$ en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM . . . . .	167
5.14. Variación del parámetro $\Pi_{Descarga}$ en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM . . . . .	168
5.15. Eficiencia Global $\varepsilon_{GF}$ en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM . . . . .	169
5.16. $E_{Carga}$ en $kWh/m^2$ de fachada en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM . . . . .	169
5.17. $E_{Descarga}$ en $kWh/m^2$ de fachada en función de $\Lambda$ para distintas cantidades de PCM . . . . .	170
5.18. Rendimientos teóricos y de simulación de intercambiador regenerativo para valores de $\Pi$ comprendidos entre 0 y 3 . . . .	170
5.19. Simulación de año completo. Temperatura del aire exterior y en la cámara. . . . .	177
5.20. Comparativa de $E_{Carga}$ estimado y obtenido mediante simulación para distintos climas . . . . .	179
5.21. Comparativa de $E_{Carga}$ estimado y obtenido mediante simulación para distinta cantidad de PCM . . . . .	180
6.1. Forjado mediante losas alveolares. Imagen: Rubiera Predisa . .	199
6.2. Losa alveolar. Imagen: Hormipresa . . . . .	200
6.3. Forjado con prelosas. Imagen: Preinco . . . . .	201
6.4. Forjado Pi. Imagen: Prefabricats de Catalunya . . . . .	201
6.5. Forjado con chapa colaborante. Imagen: Incoperfil . . . . .	202
6.6. Forjado unidireccional de vigueta y bovedilla. Imagen: Hispalyt	203
6.7. Forjado reticular. Imagen: Andece . . . . .	204

6.8. Gráficos de temperaturas horarias de año completo con y sin carga invernal . . . . .	217
6.9. Gráfico comparativo de energías y eficiencias de casos de fachada.	220
A.1. Resultados del cálculo de indicadores. Energía de Carga . . . .	245
A.2. Resultados del cálculo de indicadores. Energía de Descarga . .	246
A.3. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Utilización . .	247
A.4. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Equilibrio . .	248
A.5. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Carga Real .	249
A.6. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Carga de Diseño	250
A.7. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Instalación . .	251
A.8. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Diseño . . . .	252
A.9. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Ventilación .	253
A.10. Resultados del cálculo de indicadores. Factor de efecto Cámara	254
A.11. Resultados del cálculo de indicadores. Eficiencia Global de Fa- chada . . . . .	255
A.12. Resultados del cálculo de indicadores. Rendimiento como in- tercambiador regenerativo. Carga. . . . .	256
A.13. Resultados del cálculo de indicadores. Rendimiento como in- tercambiador regenerativo. Descarga. . . . .	257
A.14. Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior ligero. . . . .	258
A.15. Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A1. PCM variable	260
A.16. Indicadores globales. Caso:A1. PCM variable . . . . .	261
A.17. Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A1. clima variable	262
A.18. Indicadores globales. Caso:A1. clima variable . . . . .	263
A.19. Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara. . . . .	264
A.20. Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A2. PCM variable	266
A.21. Indicadores globales. Caso:A2. PCM variable . . . . .	267
A.22. Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A2. clima variable	268
A.23. Indicadores globales. Caso:A2. clima variable . . . . .	269
A.24. Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, muro interior masivo. . . . .	270
A.25. Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A3. PCM variable	272
A.26. Indicadores globales. Caso:A3. PCM variable . . . . .	273
A.27. Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A3. clima variable	274
A.28. Indicadores globales. Caso:A3. clima variable . . . . .	275
A.29. Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masi- vo, elemento interior ligero. . . . .	276
A.30. Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A4. PCM variable	278

A.31.Indicadores globales. Caso:A4. PCM variable . . . . .	279
A.32.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A4. climas variable	280
A.33.Indicadores globales. Caso:A4. climas variable . . . . .	281
A.34.Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara. . . .	282
A.35.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A5. PCM variable	284
A.36.Indicadores globales. Caso:A5. PCM variable . . . . .	285
A.37.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A5. clima variable	286
A.38.Indicadores globales. Caso:A5. clima variable . . . . .	287
A.39.Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara. . . . .	288
A.40.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A6. PCM variable	290
A.41.Indicadores globales. Caso:A6. PCM variable . . . . .	291
A.42.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A6. clima variable	292
A.43.Indicadores globales. Caso:A6. clima variable . . . . .	293
A.44.Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, muro interior masivo. . . . .	294
A.45.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A7. PCM variable	296
A.46.Indicadores globales. Caso:A7. PCM variable . . . . .	297
A.47.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A7. clima variable	298
A.48.Indicadores globales. Caso:A7. clima variable . . . . .	299
A.49.Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo. . . . .	300
A.50.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A8. PCM variable	302
A.51.Indicadores globales. Caso:A8. PCM variable . . . . .	303
A.52.Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A8. clima variable	304
A.53.Indicadores globales. Caso:A8. clima variable . . . . .	305
B.1. Gráfico de zonas y severidades climáticas de capitales de pro- vincia de España . . . . .	308
B.2. Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 20 °C . . . . .	309
B.3. Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 22 °C . . . . .	310
B.4. Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 24 °C . . . . .	310
B.5. Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 26 °C . . . . .	311
B.6. Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 28 °C . . . . .	311



B.7. Gráfico de zonas y severidades climáticas de capitales de provincia seleccionadas . . . . .	313
B.8. Tabla-gráfico de climas de las seis localidades . . . . .	314
B.9. Histogramas de temperaturas de las seis localidades . . . . .	315
B.10. Gráficos diarios de temperaturas horarias meses julio y agosto de Cuenca, Madrid y Lleida . . . . .	316
B.11. Gráficos diarios de temperaturas horarias meses julio y agosto de Granada, Cáceres y Sevilla . . . . .	317



# Indice de tablas

3.1. Clasificación y propiedades de PCM. (Wang y otros, 2009) . . .	26
3.2. Comparación de materiales orgánicos e inorgánicos . . . . .	27
3.3. Incompatibilidad por corrosión con PCMs . . . . .	29
3.4. Propiedades térmicas de los PCM candidatos para aplicación en la edificación . . . . .	31
3.5. PCMs comerciales de uso en edificación. . . . .	32
4.1. Variables básicas que intervienen en el modelo simplificado nivel 1 de fachada con PCM . . . . .	104
4.2. Coeficientes de transferencia convectivos en la cámara obteni- dos mediante ensayo . . . . .	109
4.3. Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración inicial . . . . .	114
4.4. Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración final. . . . .	118
4.5. Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración inicial. Noviembre . . . . .	122
4.6. Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración final. Noviembre . . . . .	124
5.1. Dependencia de indicadores. Tendencia cualitativa . . . . .	156
5.2. Dependencia formal y significado de indicadores de eficiencia .	156
5.3. Fachada ideal para cálculo de la dependencia de indicadores. .	172
5.4. Comparación de $E_{Diseño\ carga}$ calculado con el modelo y esti- mado en $kWh/m^2$ , meses julio y agosto. Madrid . . . . .	181
6.1. Estudio de casos de fachada con PCM . . . . .	208
6.2. Estudio de casos de fachada con carga invernal. Año completo	215
6.3. Estudio de casos de fachada año completo. Valores globales . .	216
6.4. Cálculo de viabilidad económica de fachada con PCM. VAN y TIR . . . . .	225

A.1. Fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior ligero. . . . .	259
A.2. Fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara. . . . .	265
A.3. Fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, muro interior masivo. . . . .	271
A.4. Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, elemento interior ligero. . . . .	277
A.5. Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara. . . . .	283
A.6. Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara. . . . .	289
A.7. Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, muro interior masivo. . . . .	295
A.8. Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, muro interior masivo. . . . .	301
B.1. Potencial climático para PCM de 22 °C . . . . .	318
B.2. GH de refrigeración . . . . .	318
B.3. Potencial climático restringido para PCM de 22 °C. Carga de 23 a 9 h. . . . .	319
B.4. GH de refrigeración, descarga de 12 a 19 h . . . . .	319

# Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer al Dr. Servando Álvarez, mi maestro en la energética edificatoria, no sólo por dirigir mi tesis sino por haberme enseñado a lo largo de estos años prácticamente todo lo que sé sobre este apasionante tema.

Me considero afortunado por haber tenido acceso a su conocimiento técnico pero mucho más por haberme sentido cerca de la sabiduría reposada de cada reflexión y criterio que tan sencillo parece cuando se muestra con sencillez pero deja claro que detrás hay una idea tan brillante que no alberga posible discusión. Agradezco la calidad humana en el trato al escuchar tantas veces alguna idea que en el fondo tenía más de duda que de certeza y que en tantas ocasiones demostraba simplemente una intuición. Se vive una vez y se escribe una tesis, sin su ayuda y guía habría sido imposible.

Agradezco también el apoyo recibido del resto del equipo de Termotecnia, a José Manuel Salmerón por su gran ayuda, a Álvaro Ruiz y José Sánchez por las horas recorridas juntos. También a José Luis Molina y demás por estar ahí y haberme hecho sentir becario y compañero. Mi agradecimiento sincero a la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

No puedo dejar de agradecer a Dra. Luisa Cabeza, Dr. Albert Castell y Dr. Alvaro de Gracia por haber escrito tantos y tan buenos artículos sobre PCM, por haber podido utilizar los experimentos realizados en Lleida, y porque ellos sin saberlo me han enseñado lo que son los materiales de cambio de fase.

Por último quiero agradecer al CSIC, al Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y en especial a la Dra. Carmen Andrade por haberme hecho sentir investigador y animarme a dar el paso de hacer la tesis.

A todos. Muchas gracias.



*En especial a Ana y a Marta a quienes adoro,  
y a mi padre, sevillano, y a mi hermana María,  
de los que he aprendido muchas cosas...*





# Capítulo 1

## Introducción, antecedentes y objetivos

### 1.1. Introducción

En la Unión Europea el 40 % del consumo total de energía corresponde a los edificios. La reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación constituyen una parte importante de las medidas necesarias para reducir la dependencia energética de la Unión y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con el objetivo de reducir las emisiones de  $CO_2$  en el sector edificatorio, hace más de una década la Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002 de Eficiencia Energética, se estableció como un instrumento normativo a nivel europeo que fijaba las pautas a seguir en los estados miembros. Posteriormente se ha revisado mediante la Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición), tendiendo al endurecimiento de los requisitos mínimos y persiguiendo objetivos más ambiciosos, como conseguir edificios de consumo de energía casi nulo. (European Commission, 2010).

En este tiempo se han propuesto otras Directivas tales como la Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 5 de abril de 2006 sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos, que persigue aprovechar los potenciales y rentables ahorros de energía de forma económicamente eficiente o la Directiva 2012/27/UE de 25 de octubre de 2012 relativa a la eficiencia energética, en la que se incide sobre la crecien-

te dependencia de las importaciones de energía y en la escasez de recursos energéticos, así como la necesidad de limitar el cambio climático y superar la crisis económica.

En el marco jurídico español, la Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación (LOE), estableció entre los requisitos básicos de la edificación, que los edificios se proyecten de tal forma que no se deteriore el medio ambiente y que se consiga un uso racional de la energía necesaria para la utilización del edificio, mediante el ahorro de energía y el aislamiento térmico. Para desarrollar esta Ley mediante el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, se aprobó el Código Técnico de la Edificación (CTE) (Ministerio de Fomento, 2006) que constituye el marco normativo de la edificación donde se establecen las exigencias básicas de calidad de los edificios y de sus instalaciones, que permiten verificar el cumplimiento de tales requisitos básicos, entre los cuales está el de ahorro de energía.

Mediante la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, se ha hecho una revisión del CTE para poder avanzar en los compromisos comunitarios. Este reglamento junto con el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) (Ministerio de industria, 2007) constituyen las herramientas fundamentales para la transposición de las nuevas directivas.

Son ampliamente conocidos los objetivos de la Unión Europea para 2020 que persiguen un ahorro del 20 % del consumo de energía mediante una mayor eficiencia energética, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20 % (objetivos nacionales vinculantes de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>) y promover el uso de energía procedente de fuentes renovables hasta un 20 % del consumo de energía total de la Unión. Estos objetivos no pueden alcanzarse sin movilizar el considerable potencial de ahorro energético rentable que posee el sector de los edificios.

Según los datos del Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía, IDAE publicados en el Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020, (IDAE, 2011a) aprobado por Acuerdo de Consejo de Ministros de 29 de julio de 2011, en el año 2010, el consumo de energía primaria en España ascendió a 131.927 ktep.

El consumo en 2010 experimentó un leve incremento respecto a 2009, año en el que España registró una disminución récord en la demanda, del 8,3 %

respecto a 2008. El periodo 2009-2010 representa una situación anómala causada por la crisis, lo que explica la fuerte caída en la demanda energética del año 2009 y la tímida recuperación posterior del año 2010. No obstante, en lo esencial, se mantiene la tendencia global de moderación de la demanda iniciada con posterioridad al año 2004.

El consumo de energía final del sector Edificación y equipamiento ascendió, en el año 2010, a 24.391 ktep, sobre un consumo total nacional para usos energéticos de 93.423 ktep, lo que representa el 26,1 % del consumo de energía final nacional para usos energéticos. De este consumo, 16.377 ktep correspondieron al sector de edificios de uso doméstico, es decir un 17,5 % del consumo energético nacional y 8.014 ktep al sector de edificios destinados a servicios, que representan un 8,6 % sobre el consumo energético total nacional.

La distribución del consumo en el sector de Edificios y en el sector Edificios doméstico (2010) se muestra en la figura 1.1.

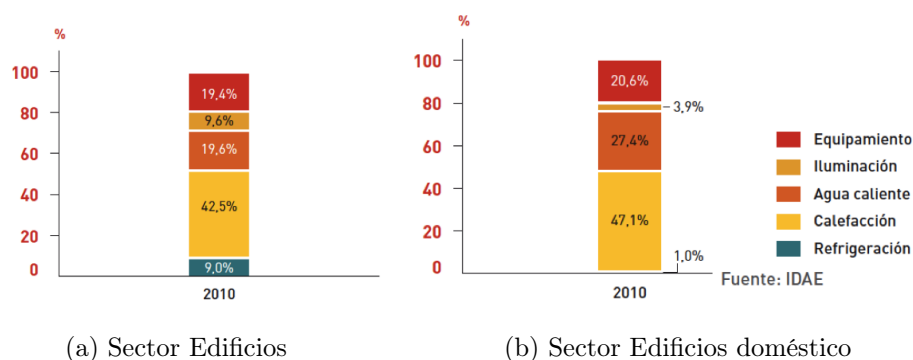


Figura 1.1: Distribución del consumo de energía en el sector Edificios y Doméstico en España 2010 (IDAE)

El balance de energía final consumida para el año 2010 en el sector Edificación y equipamiento, figura 1.1a, indica que más del 42,5 % está destinado a calefacción, seguido por un 19,6 % a ACS, un 19,4 % es empleado en el equipamiento, un 9,6 % se consume en iluminación y un 8,9 % en refrigeración. Es decir más de la mitad de la energía se emplea en el acondicionamiento térmico.

El consumo de energía final en los edificios del sector Doméstico, figura 1.1b, se distribuye, por usos, de la siguiente forma: calefacción (47,1 %), agua

caliente sanitaria (27,4 %), equipamiento (20,6 %), iluminación (3,9 %) y aire acondicionado (1,1 %).

El aire acondicionado, dada su estacionalidad, manifiesta el citado informe, no representa a día de hoy un porcentaje de consumo importante, aunque contribuye a generar picos de demanda eléctrica que pueden ocasionar problemas locales en la continuidad del suministro eléctrico en los periodos de verano en que se alcanzan las temperaturas exteriores más altas.

En el sector Servicios la distribución es diferente: calefacción (31,1 %), aire acondicionado (26,2 %), iluminación (22 %), equipamiento (17,3 %) y agua caliente sanitaria (3,3 %). Como es lógico aumenta la refrigeración e iluminación disminuyendo el agua caliente sanitaria respecto al sector doméstico.

En el Proyecto SECH-SPAHOUSEC el IDAE hizo un análisis del consumo energético del sector residencial en España (IDAE, 2011b) en el que se analizaron los consumos y comportamientos energéticos diferenciando tipos de vivienda, equipamiento y zonas.

Según los datos analizados en las viviendas las instalaciones térmicas de calefacción y agua caliente sanitaria representan casi tres cuartas partes del consumo energético y en el sector servicios las instalaciones de calefacción más refrigeración suponen más de la mitad. Todo ello unido a la gran durabilidad de los edificios, muestra la incidencia que tiene sobre el consumo energético de un país a largo plazo.

Por otra parte la Certificación Energética de los Edificios es ya una realidad. Mediante el Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, se establece la obligatoriedad de calificar energéticamente no sólo las nuevas construcciones sino también los edificios existentes ya sean de la administración o aquellos que se vayan a vender o alquilar (incluidas las viviendas).

En un futuro cercano (31 de diciembre de 2020) todos los edificios nuevos que se construyan serán edificios de consumo de energía casi nulo, a partir del 31 de diciembre de 2018 los que vayan a estar ocupados y sean de titularidad pública, (European Commission, 2010).

En este orden, las medidas a tomar para lograr reducir los consumos superan la capacidad de lo que se puede conseguir con un buen diseño y un co-

recto aislamiento del edificio y pasan por desarrollar soluciones tecnológicas que contribuyan de forma decisiva al ahorro energético y al aprovechamiento de las energías renovables. La mejora de la calificación energética de los edificios como vía para dar valor al parque existente, obliga también a una rehabilitación más que eficiente del parque construido.

Aunque actualmente existen gran cantidad de soluciones tecnológicas y propuestas para incrementar la eficiencia energética en los edificios, no todas las alternativas han sido exploradas o suficientemente estudiadas, siendo este aspecto una de las probables causas para el bajo nivel de implementación de soluciones tecnológicas innovadoras. Por tanto, es necesario la búsqueda de nuevas soluciones que hagan uso de la última tecnología y que se materialicen en nuevos productos de alta eficiencia y rentabilidad que se apliquen a casos reales. En el caso de España y gracias a su climatología esto es además posible.

Para mantener unas condiciones interiores de confort estables frente a unas condiciones exteriores variables, en la práctica se recurre a los sistemas de acondicionamiento, en caso de que estos no funcionen, las condiciones interiores serían variables con la misma frecuencia que las exteriores pero con un desfase y una amortiguación debida a la inercia del edificio. Cuando el edificio cuenta con sistemas de climatización activos, las condiciones interiores de temperatura (principalmente) tienden a mantenerse estables, pero la carga térmica que el sistema debe asumir será variable. Esta variación en la carga térmica tiene el inconveniente de hacer que el equipo deba estar dimensionado para asumir la carga punta y funcionar a carga parcial gran parte del tiempo, con el consiguiente bajo rendimiento energético. Un uso eficiente de la energía requiere hacer funcionar a los sistemas el mínimo tiempo posible y con la máxima eficiencia posible.

Una manera de reducir el anterior inconveniente y hacer más estable al edificio es hacer uso del almacenamiento de energía térmica, que además presenta las siguientes ventajas:

- Puede conservar la energía derivada de fuentes que de otra forma se desperdiciaría: energía solar, calor residual de los equipos y procesos, calor proporcionado por la infiltración de aire caliente y calor de los ocupantes, entre otros. Este principio se puede aplicar tanto a la calefacción como a la refrigeración.
- Suaviza las puntas y los valles de demanda de energía, estableciéndose

una relación más homogénea entre la oferta y la demanda. Como resultado, las instalaciones serán menores y consecuentemente la inversión inicial y los costes de operación, mejorando además el rendimiento del sistema.

Las opciones tecnológicas para almacenar energía térmica se pueden clasificar en tres grupos:

- Almacenamiento en forma calor sensible (estructura del edificio, agua, rocas), que utiliza el aumento o reducción de temperatura para el almacenamiento de energía.
- Almacenamiento en forma calor latente (hielo, parafinas, hidratos de sal, etc.), que aprovecha el elevado valor de la entalpía del cambio de fase.
- Almacenamiento por medio de reacciones químicas endotérmicas o exotérmicas reversibles.

En la edificación tradicional en España se construye con sistemas pesados que indirectamente aportan una masa térmica apreciable que actúa como almacén de energía. Siendo posible su inclusión en el primer grupo, lo normal es que no esté diseñado para este fin, siendo incluso en ocasiones contraproducente. Además esta tendencia está cambiando en los sistemas innovadores de menos masa para las mismas prestaciones.

El almacenamiento de calor en forma latente, Latent heat thermal energy storage (LHTES), surge en consecuencia como una alternativa interesante a explorar dado que se diseña con este fin proporcionando un potencial de almacenamiento térmico muy superior al que se puede lograr con el almacenamiento en forma de calor sensible. La energía necesaria para el cambio de fase que es necesario suministrar o que el sistema libera siempre es muy superior comparativamente a la del calor sensible.

En la figura 1.2, (Hauer y otros, 2005) se muestra una comparación entre los espesores que se requieren de distintos materiales y el que se requeriría con un material de cambio de fase para almacenar la misma cantidad de calor; se aprecia que el espesor necesario con un material de cambio de fase es de un orden de magnitud mucho menor que el necesario con el almacenamiento en forma de calor sensible.

El almacenamiento diario (no estacional) es una alternativa posible en los edificios donde se puede almacenar calor durante el día para su uso posterior

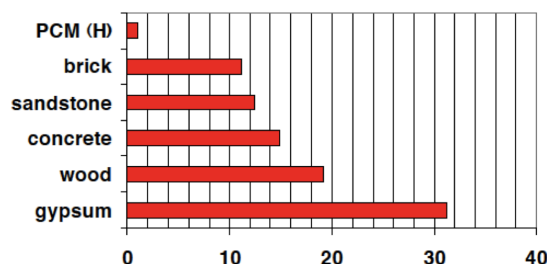


Figura 1.2: Espesor requerido de distintos materiales para obtener la misma capacidad térmica, (Hauer y otros, 2005)

en la noche, o que puede extraerse con el frío de la noche el calor absorbido durante el día.

El almacenamiento de energía térmica mediante reacciones endotérmicas-exotérmicas reversibles, no parece una alternativa viable actualmente para la edificación por su elevado coste y bajo nivel de desarrollo para este sector. Sin duda cambiará en el futuro cuando se desarrolle suficientemente y se estudie en detalle la integración.

El almacenamiento estacional de energía ha sido estudiado por distintos autores, ya sea en forma de calor latente o sensible o de almacenamiento químico, pero dado que se basa en elementos externos al edificio, tanques, terreno, etc. no al almacenamiento estructural, su alcance no concuerda con el de esta tesis.(Braun y otros, 1981), (Pinel y otros, 2011).

## 1.2. Antecedentes

Actualmente existe una amplia bibliografía relacionada con la implementación de sistemas de cambio de fase en la edificación. La primera aplicación de los materiales de cambio de fase o (PCM) por su acrónimo en inglés (Phase Change Material) fue desarrollada para calefacción y refrigeración de edificios está descrita en la literatura por (Telkes, 1975) y (Lane, 1983). Este uso de componentes estructurales para el almacenamiento térmico ya fue sugerido en 1975 por (Barkmann y Wessling, 1975), y posteriormente por otros autores (Hawes y otros, 1993), (Ibrahim, 2002). Estudios más recientes han encontrado ahorros de energía comprendidos entre el 15 y el 20 %, asociados al uso de los PCMs (Peippo y otros, 1991), (Khudhair y Farid, 2004), (Tyagi y Buddhi, 2007), (Mehling y Cabeza, 2008), (Baetens y otros, 2010), (Agyenim

y otros, 2010), así como una gran variedad de materiales para ser utilizados como PCM, (Heating y otros, 2005), (Cabeza y otros, 2011), (BASF, 2012).

Los materiales de cambio de fase han de satisfacer una serie de requisitos, entre ellos:

- Temperatura de cambio de fase comprendida entre 20°C y 27°C.
- Alta estabilidad frente a los ciclos de cambio de fases que garantice elevada durabilidad, dada la prolongada vida útil de los edificios.
- No corrosivos, evitándose daños a la estructura del edificio en caso de fuga.
- Garantizar un nivel elevado de protección de la salud humana y el medio ambiente. (REACH. European Commission, 2006)

Con todo, existen numerosas aplicaciones donde el uso de los PCMs no ha dado resultados satisfactorios entre otros, por los siguientes motivos:

- Una inadecuada elección del material que hace que no se produzca en su uso normal el cambio de fase.
- Una inadecuada disposición que impide solicitar el elemento constructivo que contiene PCM en su composición, bien por no poner en contacto de forma efectiva el fluido transmisor del calor con el material o bien por no activarse éste lo suficiente al existir un elemento que dificulta la transmisión de calor o debido a una baja transferencia en sí misma.

De los anteriores intentos fallidos se deduce que uno de los retos para la implementación de los materiales de cambio fase es lograr que efectivamente el cambio de fase se lleve a cabo, lo cual no es nada fácil debido a la gran cantidad de energía que se puede almacenar o liberar. Por ello es necesario proporcionar vehículos de transporte de calor para que esa energía pueda llegar o salir del material de cambio de fase lo que conlleva elevados coeficientes de transferencia de calor y una área de transferencia de calor suficientemente alta.

En el proyecto de investigación "MECLIDE" (Soluciones estructurales con materiales especiales para la climatización diferida de edificios) se ha conseguido demostrar de forma experimental la viabilidad técnica en la activación de los materiales PCM. El objetivo de este proyecto fue el de reducir las



demandas de refrigeración del edificio en el que se instala mediante una estrategia de almacenamiento y evacuación controlada del calor del material del que están rellenos los contenedores.

Las soluciones del proyecto "MECLIDE" propuestas utilizan materiales de cambio de fase incluidos en unos contenedores que están situados en una cámara de aire en la que el aire se mueve de manera forzada mediante ventiladores, en principio de caudal variable. Esta corriente de aire es gobernada por un sistema de control que puede cambiar el caudal, la procedencia y el destino de la misma o incluso anularla por completo.

Para verificar el correcto funcionamiento de un sistema se requiere del uso de modelos de cálculo que permitan un diseño óptimo. Los modelos deben ser fieles a la realidad.

Los resultados obtenidos en el proyecto de investigación citado permiten calibrar el modelo expuesto y desarrollado en esta Tesis por lo que los resultados obtenidos pueden considerarse fiables para su aplicación en casos reales.

En resumen, los materiales de cambio de fase (PCM) son una técnica prometedora para incrementar la eficiencia energética de los edificios aunque debido a que existen casos fallidos, es necesario profundizar en su estudio a fin de convertirla en una técnica viable para la práctica edificatoria común.

Por otra parte, carece de sentido la utilización de sistemas PCM si no son viables desde el punto de vista económico. El análisis de su rentabilidad para diferentes situaciones es preceptivo para que esta tecnología se desarrolle convenientemente.

## 1.3. Objetivos

El objetivo de la presente tesis y que constituye su principal aportación, es la obtención y caracterización de soluciones constructivas basadas en la integración estructural de componentes de cambio de fase, estudiando su eficiencia y demostrando su viabilidad desde el punto de vista técnico y económico. Un desglose de los aspectos innovadores propuestos es:

- La integración eficaz de los sistemas de almacenamiento de energía en los elementos constructivos que componen la estructura del edificio,

frente a los intentos que se han realizado donde se acude a depósitos u otros dispositivos externos.

- Los sistemas que se proponen presentan prestaciones más allá de los que han podido obtenerse hasta la fecha, puesto que admiten un almacenamiento tanto en el interior de los elementos constructivos (fachadas y particiones) como en núcleo de otros elementos tales como los forjados. Este hecho también hace que la tecnología a desarrollar pueda adaptarse a una mayor variedad de situaciones y encuentre mayor número de posibles aplicaciones.
- Los sistemas estudiados emplean una serie de aspectos que no han sido cubiertos con anterioridad, a saber: Uso de técnicas de refrigeración natural para la carga de energía, ventilación nocturna, aplicables tanto en fachadas como en forjados así como su posible extensión a otros elementos constructivos tales como las cubiertas.
- La propuesta del uso de métodos simplificados para su prescripción acordes con las condiciones constructivas y climáticas españolas.
- El análisis del comportamiento de las soluciones mediante la propuesta de un conjunto de indicadores de eficiencia que permitan interpretar los resultados obtenidos y sirvan para el correcto diseño y dimensionado.
- El análisis de la viabilidad en diferentes climas desde el punto de vista técnico y de su capacidad de utilización lo que incide directamente en los aspectos de rentabilidad económica, permitiendo comparar los resultados obtenidos en la investigación con otras tecnologías en términos de igualdad.
- Adicionalmente, se abre la posibilidad de la combinación de la tecnología con otras tales como el uso de sistemas evaporativos para potenciar el efecto del enfriamiento natural al que se ha hecho referencia anteriormente.

## 1.4. Valoración inicial

Como se ha dicho la integración estructural de materiales de cambio de fase es una tecnología prometedora que se encuadra entre las de acumulación energética (Energy Storage) y que de ser efectiva puede contribuir de forma decisiva a la disminución del consumo energético de los edificios.

Aunque el almacenamiento estacional sea posible, como por ejemplo mediante técnicas de geotermia superficial, el almacenamiento estructural mediante materiales de cambio de fase conllevaría gran cantidad de material. Para reducir la cantidad de material a valores razonables es preciso recurrir como estrategia a incrementar la frecuencia en la activación. Es decir para que esta efectividad sea un hecho el PCM debe estar suficientemente activado en un número significativo de ciclos de almacenamiento y descarga. Por ello el almacenamiento se plantea diario, no estacional. Se debe lograr que la congelación y descongelación del material sea diaria, el mayor número de días posible.

El sistema de almacenamiento además debe ser compatible con el uso del edificio sin producir trastornos a los ocupantes o pérdidas de habitabilidad de los espacios del edificio durante periodos prolongados.

El principal problema radica en transferir en un tiempo limitado gran cantidad de energía del medioambiente al PCM a través de un fluido de transporte (agua o aire). Desde un punto de vista muy general el PCM puede estar embebido en los materiales de construcción, en su superficie o en elementos específicos dispuestos a tal efecto.

Para que la activación del PCM se produzca se requiere tiempo, área de transferencia y una correcta transferencia térmica, además de gradiente térmico.

Por los motivos expuestos la integración en superficies interiores de los espacios habitables del edificio puede conllevar la disposición de instalaciones auxiliares (agua) que produzcan la activación, o la necesidad de grandes corrientes de aire, que previsiblemente pueden ser incompatibles con el uso. La utilización de instalaciones auxiliares tiene la penalización añadida de requerir una doble transferencia, del medio ambiente a la instalación y de la instalación al PCM, lo que lo complica y además reduce su rendimiento.

El estudio de todas las técnicas posibles de almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase resulta inabordable y supera el alcance de una tesis doctoral, por lo que se debe restringir éste a un ámbito acotado. Por ello, aunque en el estado del arte se estudie el problema con un prisma más abierto, el desarrollo de técnicas se restringirá a un conjunto de soluciones que se estima puedan ser válidas. En el desarrollo de esta tesis se tratarán sistemas directos de transferencia con el aire en los que el PCM está incluido en elementos específicos en el seno de los sistemas constructivos.



# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. Hipótesis

La hipótesis de esta tesis es que los materiales de cambio de fase efectivamente pueden contribuir a la reducción de la demanda de energía de los edificios de forma viable para las condiciones climatológicas españolas, pero que para ello se requiere de un diseño adecuado para que sus prestaciones y operación corresponda con lo esperado.

También se plantea que es posible convertir la integración de materiales de cambio de fase en práctica habitual en la edificación si se cumplieran las siguientes condiciones:

- Productos comerciales que se puedan encontrar en el mercado, que sean económicamente asequibles y que además se puedan integrar e instalar fácilmente; es decir sin un alto sobre coste inicial y sin alterar en exceso las soluciones constructivas tradicionales.
- Existencia de métodos simplificados de diseño y dimensionado. Se debe disponer de métodos simplificados que permitan evaluar la respuesta del sistema ante las solicitudes previstas.
- Existencia de indicadores específicos que permitan desde la simulación comprobar la eficacia de las soluciones técnicas propuestas.
- Avanzar en el conocimiento y experiencia en el uso de la tecnología por parte de los proyectistas para lograr un diseño integrador entre los elementos estructurales (que contengan el material de cambio de fase) y los sistemas energéticos del edificio. La utilización combinada

de ambas tecnologías junto con la disponibilidad de soluciones específicas adaptadas a climatología española contribuirá al ahorro energético manteniendo el bienestar térmico en términos de coste óptimo.

- Disponer de guías de diseño orientadas a los arquitectos y demás proyectistas con algunas reglas básicas para que desde las etapas tempranas del proyecto se considere la incorporación de los materiales de cambio de fase.
- La existencia de herramientas de evaluación o cálculo. Sebe disponer de métodos o herramientas informáticas (compatibles con las oficiales) para que una vez considerado en las etapas de prediseño, sea posible calcular el beneficio energético que la incorporación de los materiales de cambio de fase ocasionarán, de forma sencilla para el proyectista, demostrable y aplicable en la obtención de la certificación energética.

Lo anterior no sería eficaz sin un conocimiento de los aspectos relacionados con la puesta en obra y el correcto uso y mantenimiento.

En resumen, la utilización de la tecnología de almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase como respuesta viable para el ahorro energético en los edificios involucra a todos los agentes del sector de la construcción, desde la administración a los fabricantes de productos, los proyectistas, las empresas constructoras y por supuesto los promotores y usuarios. De cumplirse la hipótesis planteada, ésta se convertiría en una tecnología alternativa sostenible muy apropiada para la climatología española.

## 2.2. Plan de trabajo

Para el desarrollo de la Tesis se proponen las siguientes tareas:

- Investigación del estado del arte.
- Desarrollo y utilización de modelos simplificados para la simulación térmica de los sistemas.
- Calibración de modelos mediante ensayos experimentales.
- Desarrollo de Indicadores de Eficiencia Energética para la valoración de soluciones técnicas.

- Estudio de la integración de PCMs en la edificación.
- Estudio de viabilidad con respecto a climas de referencia de España.
- Establecimiento de conclusiones y verificación de la hipótesis.

### **2.2.1. Investigación del estado del arte**

El objetivo de esta tarea es describir el panorama actual de las investigaciones relacionadas con los materiales de cambio de fase aplicados a la edificación, centrando la atención en los materiales que están siendo usados en productos comerciales y de materiales prometedores para su aplicación en la edificación; y en los modelos de cálculo existentes. Se estudiarán también patentes relacionadas con el uso de PCM en edificación.

### **2.2.2. Desarrollo y utilización de modelos simplificados**

Esta tarea tiene como primer objetivo el desarrollo y utilización de modelos teóricos simplificados que se puedan utilizar para simular el comportamiento térmico de distintos sistemas revisados en el estado del arte y propuestos que incorporan materiales de cambio de fase.

Las aplicaciones en las que se centrará el estudio de la incorporación de los sistemas de cambio de fases son las fachadas ventiladas con PCM incluido en la cámara interior y forjados que alberguen elementos con PCM solicitados desde el interior con aire.

Se hará un estudio completo del sistema de fachada planteando el posible estudio del forjado.

Los resultados de esta tarea se utilizarán como herramienta de análisis para poder elegir entre las aplicaciones posibles aquellas que, evaluadas mediante el modelo simplificado, arrojen un mayor beneficio como consecuencia de su utilización.

### **2.2.3. Calibración del modelo mediante ensayos experimentales**

De acuerdo al sistema elegido se realizará un seguimiento de los ensayos llevados a cabo, las variables y los parámetros monitorizados.

Los ensayos son los realizados en el marco del proyecto "MECLIDE" cuyo objetivo es la obtención de una solución constructiva para la envolvente de edificios basada en la integración estructural de componentes especiales que contribuyan a disminuir la demanda de energía del edificio además de verificar su función estructural.

Haciendo uso de los ensayos experimentales se comprobará la validez del modelo desarrollado llevándose a cabo su calibración.

#### **2.2.4. Desarrollo de Indicadores de Eficiencia Energética**

Se definirá un conjunto de indicadores de eficiencia energética que sean representativos de las distintas variables que inciden en el comportamiento de los sistemas de almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase. Se estudiará desde el punto de vista de los rendimientos obtenidos como un intercambiador regenerativo.

Se analizará la dependencia formal y funcional de los indicadores a las variables fundamentales con vistas a poder predecir a través de éstos el comportamiento desde el punto de vista energético.

Los indicadores se plantearán como método y herramienta de ayuda al diseño de las soluciones y su evaluación y se aplicarán con detalle al caso de fachada.

#### **2.2.5. Estudio de la integración de PCMs en la edificación**

Esta tarea tiene como objetivo principal analizar la integración de los elementos de almacenamiento estructural en el edificio.

Se analizarán los distintos sistemas que componen el edificio (estructura, cerramientos, instalaciones, etc.) buscando la compatibilidad y la viabilidad de la integración desde el punto de vista de los requisitos técnicos que debe cumplir.

Se analizará la idoneidad de las soluciones de integración estructural para los elementos constructivos que lo hacen posible de cara a la selección de las aplicaciones con mayor potencial de ahorro.



Durante el desarrollo de esta tarea se analizarán los elementos constructivos susceptibles de incorporar materiales de cambio de fase, se darán propuestas de productos finales industrializados para las distintas aplicaciones de tal manera que su comercialización sea posible.

Se propondrán un conjunto de soluciones tipo de fachadas ventiladas con integración de PCMs simulando su comportamiento para varios climas y situaciones.

Con el resultado de esta tarea se pondrá de manifiesto la validez del método desarrollado para que a través de los indicadores definidos se pueda cuantificar correctamente la cantidad de material de cambio de fase necesario y las condiciones de operación para cada aplicación según el uso del edificio y el clima donde dicho edificio se encuentre.

### **2.2.6. Estudio de viabilidad de soluciones**

Para comprobar la viabilidad del uso de las aplicaciones propuestas de fachada se realizará un estudio en el que para un conjunto limitado de situaciones se estudiará la aplicación de las soluciones propuestas analizando el ahorro y la eficiencia esperada, obtenida mediante los indicadores, en comparación con el posible ahorro obtenido a nivel de edificio. Se valorará el ahorro resultante en relación con el coste estimado.

De esta actividad se deducirá la validez de la hipótesis de partida, indicando en qué tipo de edificios, usos y climas es más adecuada la utilización de esta tecnología.

### **2.2.7. Establecimiento de conclusiones**

Esta tarea tiene como finalidad el establecimiento de conclusiones finales, la verificación de la hipótesis y la propuesta de posibles líneas de investigación futuras.



# Capítulo 3

## Estado del Arte

### 3.1. Introducción

La capacidad de acumular energía térmica por parte de los materiales de construcción hace que los edificios mantengan unas condiciones más estables de temperatura interior amortiguadas y desfasadas en el tiempo frente a las oscilaciones exteriores. En la construcción tradicional de edificios en España, los sistemas constructivos masivos suponen en sí mismos un procedimiento de almacenamiento estructural a diferencia de la construcción más ligera usada en otras culturas.

La cantidad de energía térmica necesaria para que un cuerpo cambie su temperatura es considerablemente inferior a la del cambio de fase. Por ello la posibilidad de utilizar materiales cuyo cambio de fase se produce a temperaturas en el entorno de las temperaturas de confort permite aprovechar ese potencial para utilizarlo en el almacenamiento de calor. Los materiales empleados para tal efecto son denominados “materiales de cambio de fase” o “PCM” que corresponde con sus siglas en inglés (Phase Change Materials).

En este capítulo se hace una revisión del estado del arte de la utilización estructural de los materiales PCM. Se describirán estos materiales y las investigaciones realizadas haciendo hincapié en su aplicación real destacando los éxitos obtenidos y los problemas asociados sobre todo relacionados con su integración y condiciones de funcionamiento.

## 3.2. Almacenamiento de energía térmica

### 3.2.1. Definición de almacenamiento de energía

Los edificios almacenan en su interior energía térmica procedente del medioambiente (captación solar y aire) y de las fuentes internas. Esta energía contribuye parcialmente a cubrir las necesidades térmicas del edificio requeridas para alcanzar el bienestar térmico. Debido al desfase entre la oferta y demanda y su diferencia en valor absoluto sería necesario disponer de un almacenamiento térmico adicional que proporcionara la energía en el momento preciso paliando la demanda que normalmente se cubre mediante las instalaciones del edificio.

Se define almacenamiento térmico como la capacidad de guardar energía térmica para utilizarse con fines energéticos.

Las tecnologías existentes para almacenar energía son:

- Almacenamiento en forma de calor sensible, utilizando el aumento o reducción de temperatura para el almacenamiento de energía en los materiales de construcción, agua, suelos y rocas;
- almacenamiento en forma de calor latente, aprovechando el elevado valor de la entalpía del cambio de fase (hielo, parafinas, hidratos de sal);
- almacenamiento por medio de reacciones químicas endotérmicas o exotérmicas reversibles.

En 1983 Abhat desarrolló una clasificación de los materiales de cambio de fase para el almacenamiento de energía. (Abhat, 1983). Figura 3.1. Otra clasificación fue propuesta por Mehling y Cabeza en 1997. En (Cabeza y otros, 2011) se hace una completa revisión de los PCM como materiales de almacenamiento de energía. Figura 3.2.

Las principales aplicaciones del almacenamiento térmico en los edificios (Hawes y otros, 1993) pueden ser utilizadas debido a los siguientes factores:

- Conservan la energía proporcionada por fuentes que de otro modo no serían utilizadas, energía solar, equipos y ocupantes;
- estabilizan el comportamiento térmico del edificio y la relación entre oferta y demanda;

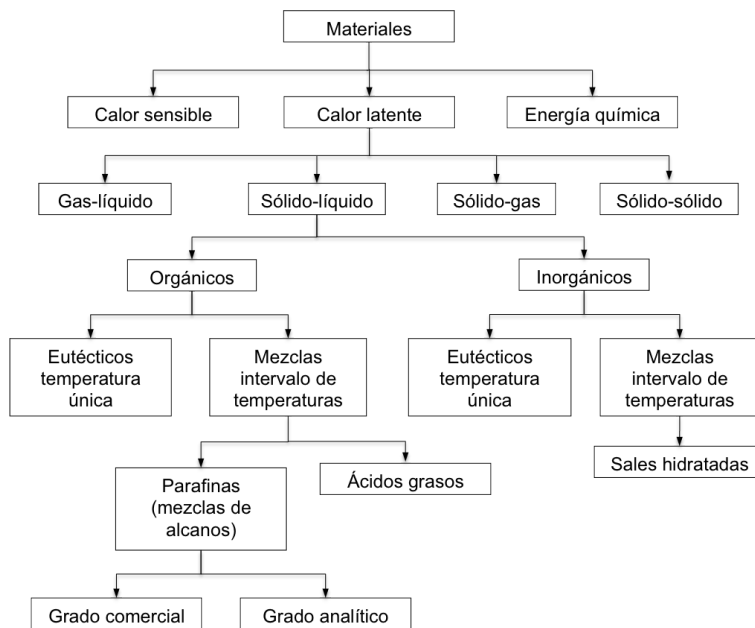


Figura 3.1: Clasificación de materiales de almacenamiento de energía (Abhat, 1983)

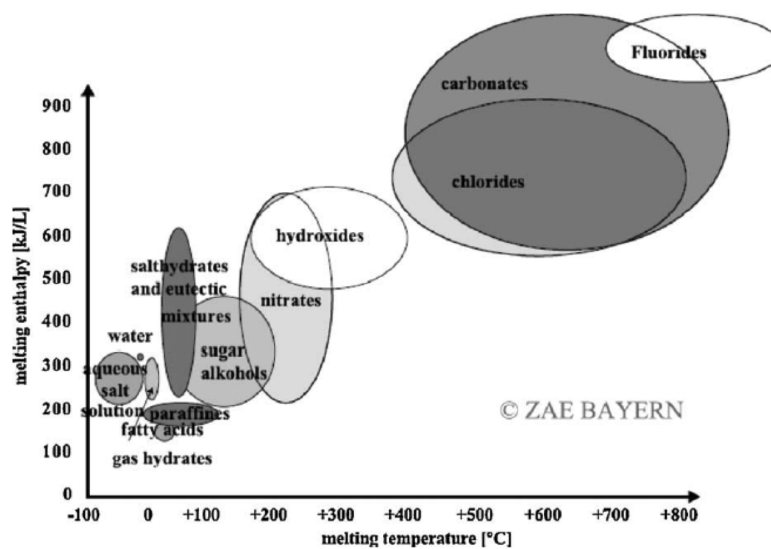


Figura 3.2: Clases de materiales que pueden ser utilizados como PCM en función de la temperatura y entalpía de cambio de fase. Gráfico: ZAE Bayern (Mehling y Cabeza, 2008)

- permiten compensaciones usando la diferencia térmica entre noche y día. El calor almacenado de día puede disiparse de noche;
- reducen las necesidades de equipamiento. A menor demanda menores equipos.

### 3.2.2. Calor sensible vs. calor latente

El calor sensible es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de un material. La utilización de la capacidad de almacenamiento de energía térmica mediante el empleo del calor sensible ha sido empleado desde siempre en arquitectura, es la llamada inercia térmica.

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (3.1)$$

Siendo  $m$  la masa y  $c$  el calor específico.

El calor latente es la energía necesaria para el cambio de fase de un material y en general presenta mayor densidad de energía que el calor sensible. Hay tres tipos de cambio de fase: sólido-sólido, sólido-líquido y líquido-gas.

$$Q = m \cdot \lambda \quad (3.2)$$

Siendo  $\lambda$  el calor latente (J/kg) del material de cambio de fase.

El cambio de fase sólido-sólido presenta la menor densidad de energía. El cambio de fase líquido-gas es el de mayor densidad de energía, pero la expansión volumétrica que implica lo hace difícilmente utilizable para el almacenamiento de energía térmica tanto a presión constante como a volumen constante.

La evaporación del material del cambio de fase y su emisión a la atmósfera hace que salvo en caso de agua sea inviable tanto por la pérdida del mismo como por la contaminación asociada.

El cambio de fase sólido-líquido presenta alta densidad de energía y tiene poca expansión volumétrica, convirtiéndolo en el más conveniente. (Dinçer y Rosen, 2010) (Mehling y Cabeza, 2008)

La utilización del cambio de fase sólido-líquido se produce en un estrecho rango de temperaturas, lográndose un buen control de temperatura. (PARIS

y otros, 1993)

Si se combina con sistemas de energía solar puede proporcionar un uso solar continuo de dicha energía, especialmente para la calefacción en invierno. (Zalba y otros, 2003). En verano también se puede utilizar el efecto de enfriamiento de la ventilación nocturna para retirar el calor acumulado durante el día. Ambas compatibles con las tecnologías de diseño pasivo de calefacción solar y refrigeración. (Chan y otros, 2010).

### **3.2.3. Materiales de cambio de fase**

El almacenamiento estructural mediante materiales de cambio de fase supone que éstos se incorporen al edificio como materiales o productos de construcción y por ello deben cumplir los mismos requisitos que son de aplicación a estos.

En general en función de su funcionamiento se requerirá un margen de temperatura de utilización (20 - 27 °C), alta estabilidad a los ciclos de cambio de fases debido a la larga vida útil de los edificios y compatibilidad con el contenedor de forma que éste no se degrade (corrosión), reduciendo el riesgo de fuga y posibles daños al edificio o sus ocupantes.

Una limitación de los PCM para su aplicación en la construcción es la estacionalidad, pues el PCM debe ser seleccionado para aplicaciones de sólo refrigeración o de calefacción. Esta limitación reduce los beneficios térmicos, el ahorro energético y su viabilidad económica. (Pasupathy y Velraj, 2008) estudiaron un concepto de doble capa de PCM para que funcionara durante todo el año.

#### **3.2.3.1. Requisitos**

El Código Técnico de la Edificación establece una serie de exigencias básicas que han de cumplir los edificios y que en consecuencia afectan a los productos y materiales. Por ejemplo en cuanto reacción al fuego o la salubridad.

Las exigencias sobre determinadas prestaciones dependerán de cómo se dispongan en el edificio. Si los materiales van a estar confinados y no entran en contacto con el medio las condiciones de salubridad del edificio quedan siempre garantizadas, no siendo necesario comprobar cómo afecta el PCM

a la salubridad. En cualquier otro caso o en contacto con el medioambiente deben ser estudiadas específicamente para no poner en riesgo a los ocupantes o al entorno.

Por otra parte se debe observar el Reglamento (CE) n° 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo de 18 de diciembre de 2006 relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y preparados químicos (REACH), (REACH. European Commission, 2006)

Igualmente los productos de construcción deben cumplir el Reglamento (UE) N° 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 9 de marzo de 2011, por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción. El reglamento, deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo y establece que cada producto debe tener una Declaración de Prestaciones (DoP) que es equivalente a la Declaración de Conformidad (DoC) de la DPC. Asimismo, establece la necesidad de disponer de hojas de seguridad que identifiquen las posibles sustancias reguladas que contengan el producto.(Sanjuán, 2012)

En este sentido el Reglamento establece los llamados Requisitos Básicos de las obras de construcción entre los que se encuentran los relativos a Higiene, salud y medio ambiente (en este caso relacionado con las emisiones de sustancias peligrosas, compuestos orgánicos volátiles (COV), gases de efecto invernadero o partículas peligrosas, en espacios interiores y exteriores) y a utilización sostenible de los recursos naturales (la utilización de materias primas y materiales secundarios en las obras de construcción que sean compatibles desde el punto de vista medioambiental)(European Commission, 2011)

#### **3.2.3.2. Clasificación**

En 2005 (Sharma y Sagara, 2005) presentan una clasificación detallada de los materiales de cambio de fase. Figura 3.3

Las principales características son:

- **Orgánicos:** Estos a su vez son clasificados como parafínicos y no parafínicos. Las principales características son: fusión congruente (cuando un sólido funde dando un líquido de igual composición), autonucleación. Por lo general no corroen los materiales que lo contienen. La cera de



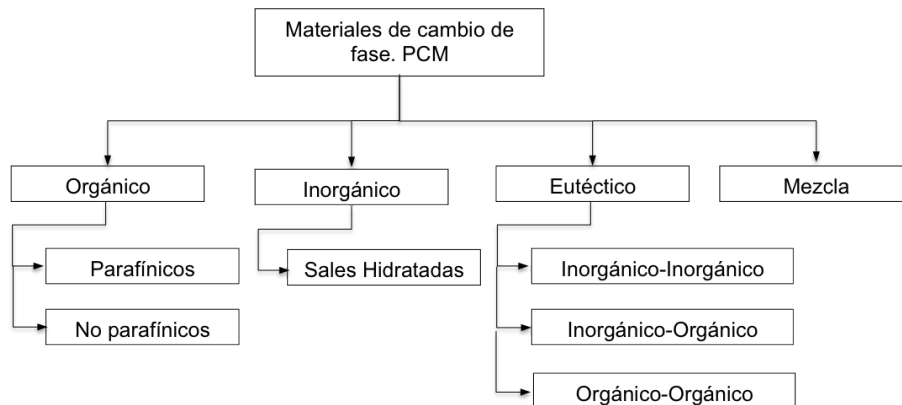


Figura 3.3: Clasificación de materiales PCM (Sharma y Sagara, 2005)

parafina es altamente estable a los ciclos de congelación y fusión, tiene baja reactividad y está clasificada como no tóxica. Además, puede ajustarse un amplio rango de temperaturas de cambio de fase. El principal inconveniente es su inflamabilidad.

- **Inorgánicos:** Se clasifican en sales hidratadas y metálicos. Tienen un elevado calor latente por unidad de masa, son más baratos que los orgánicos y no son inflamables. Mantienen la temperatura estable durante todo el proceso de cambio de fase, pero tienen desventajas como son el subenfriamiento y la segregación que pueden hacer cambiar sus propiedades.

Algunos estudios recientes se han centrado los hidratos de sal por su bajo costo y alta disponibilidad. Sin embargo, algunos problemas como el subenfriamiento y la segregación modifican su comportamiento térmico lo que ha dado lugar a un creciente interés en nuevos materiales, como las sustancias orgánicas anhidras, las parafinas y los ácidos grasos (Khudhair y Farid, 2004)

Estos materiales son más caros que las sales hidratadas, pero presentan algunas ventajas, tales como la estabilidad física y química, y un buen comportamiento térmico (PARIS y otros, 1993).

(Wang y otros, 2009) desarrollan la clasificación de materiales PCM según sus propiedades distinguiendo entre inorgánicos y orgánicos y estableciendo medidas de mejora para estos. Tabla 3.1

Tabla 3.1: Clasificación y propiedades de PCM. (Wang y otros, 2009)

CLASIFICACIÓN	INORGÁNICOS	ORGÁNICOS
Clase	Hidratos de sal, sales fundidas, metales o aleaciones	Hidrocarburos alifáticos, ácidos / ésteres o sales, alcoholes, Hidrocarburos aromáticos, cetonas, lactámicos, freón, resinas sintéticas (carbonatadas), polímeros
Ventajas	Alta densidad de almacenamiento energético, Elevada conductividad térmica, no inflamable, baratos	Estabilidad física y química, buen comportamiento térmico, zona de transición graduable
Inconvenientes	Subenfriamiento, Segregación en fases, corrosivo	baja conductividad térmica, baja densidad, baja temperatura de fusión, altamente volátiles, inflamables, cambios de volumen
Medidas de mejora	Mezcla con agentes nucleantes y espesantes, Disponer en capas delgadas horizontalmente, agitación mecánica	Aditivos con alta conductividad térmica, aditivos retardantes de fuego

### 3.2.3.3. Propiedades termofísicas

Existe mucha información sobre las propiedades termofísicas de los materiales de cambio de fase. Zalba et al.; Sharma y Sagara; y Kenisarin y Mahkamov; presentaron una extensa revisión de los materiales de cambio de fase para distintas aplicaciones. ((Zalba y otros, 2003), (Sharma y Sagara, 2005), (Kenisarin y Mahkamov, 2007), (Tyagi y Buddhi, 2007), (Sharma y otros, 2009)).

La figura 3.4 presenta sus propiedades generales en términos de punto de fusión y su rango y calor específico y entalpía. Una comparación de las ventajas y desventajas de los materiales orgánicos e inorgánicos se muestra en la tabla 3.2.

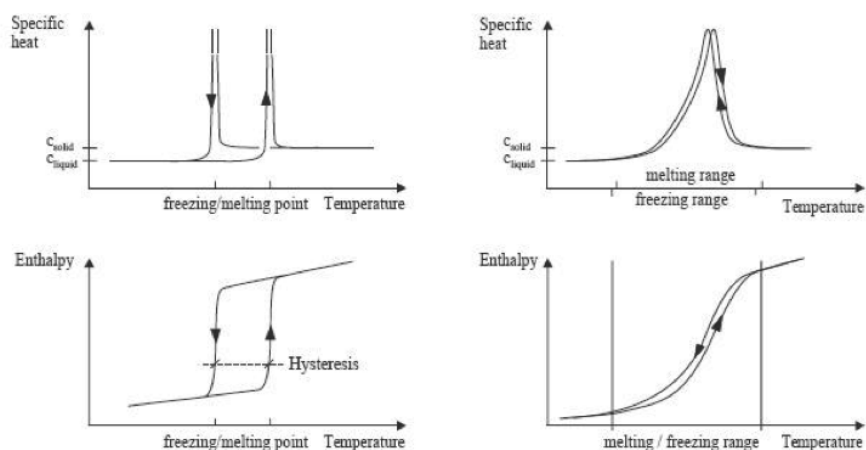


Figura 3.4: Comportamiento general de los PCMs en términos del calor específico y entalpía. Inorgánicos izquierda-Orgánicos derecha. (Koschenz y Lehmann, 2004)

Tabla 3.2: Comparación de materiales orgánicos e inorgánicos

ORGÁNICOS	INORGÁNICOS
	Ventajas
No corrosivos Bajo o inexistente subenfriamiento Estabilidad térmica y química	Superior entalpía de cambio de fase
	Desventajas
Menor entalpía de cambio de fase Baja conductividad térmica Inflamables	Subenfriamiento Corrosivos Separación de fases Segregación de fases. Sin de estabilidad térmica

#### 3.2.3.4. Estabilidad

Múltiples estudios han demostrado la estabilidad de los PCM a base de parafina frente a múltiples ciclos de fusión y solidificación, sin que se presente cambios en sus propiedades. ((Sharma y otros, 1999), (Sharma y otros, 2002), (Hadjieva y otros, 1992), (Gibbs y Hasnain, 1995)).

Por otra parte, las sales hidratadas presentan problemas de segregación y subenfriamiento (Lane, 1983) ante el sometimiento a un número elevado de ciclos. Para reducir este comportamiento negativo las investigaciones se centran en la inclusión de agentes espesantes (Cabeza y otros, 2003), para disminuir la segregación y nucleantes, para reducir el subenfriamiento (Ryu y otros, 1992). Estos aditivos suelen modificar el comportamiento térmico de las sales hidratadas y los esfuerzos se centran en minimizar sus efectos negativos manteniendo los positivos.

Otra serie de estudios ((Costello y otros, 1978), (Edie y Melsheimer, 1976) (Fouda y otros, 1984) (Farid y Yacoub, 1989) (Farid y Khalaf, 1994) abordan los problemas de las sales hidratadas desde otra perspectiva. Ésta es la de utilizar las sales hidratadas en contacto directo con un fluido de transferencia de calor inmiscible. La agitación causada por el fluido de transferencia de calor minimiza el subenfriamiento e impide la formación de la fase de segregación (Farid y otros, 2004).

La exposición a altas temperaturas puede dañar algunos productos (encapsulados), siendo necesario para que funcionen correctamente volver a someterlos a temperaturas bajas.

#### 3.2.3.5. Corrosión

Varios tipos de materiales de cambio de fase han sido probados en contacto con metales y plásticos ((Heine, 1987), (Groll y otros, 1990), (Cabeza y otros, 2001a), (Cabeza y otros, 2001b), (Cabeza y otros, 2002), (Nagano y otros, 2004), (Cabeza y otros, 2005), (Sari y Kaygusuz, 2003), (Lázaro y otros, 2006a)). La Tabla 3.3 presenta diferentes combinaciones señalando los problemas de corrosión.

El problema de la corrosión en los tanques de almacenamiento se ha resuelto mediante el uso de tanques hechos de diversos plásticos. El confinamiento con materiales compatibles evita de forma eficaz la incompatibilidad

Tabla 3.3: Incompatibilidad por corrosión con PCMs

PCM	Metales	Plasticos
Sales eutécticas	Posible corrosión	Compatible
Sales hidratadas	Posible corrosión	Compatible
Acidos grasos	Posible corrosión	Compatible
Orgánicos	Compatible	Posible corrosión

con los materiales del edificio.

### 3.2.3.6. Comportamiento ante el fuego

El comportamiento frente al fuego de los materiales de construcción es un punto clave para su aplicación en casos reales. En España el Documento Básico SI del Código Técnico de la Edificación limita la Reacción al fuego y la Resistencia al fuego de los elementos constructivos que componen el edificio. La clasificación del comportamiento frente al fuego se establece mediante un sistema común para toda Europa que viene recogido en el Real Decreto 842/2013, de 31 de octubre.

La Reacción al fuego se define como la respuesta de un material al fuego medida en términos de su contribución al desarrollo del mismo con su propia combustión, bajo condiciones específicas de ensayo. La Resistencia al fuego es la capacidad de un elemento de construcción para mantener durante un período de tiempo determinado la función portante que le sea exigible, así como la integridad y/o el aislamiento térmico en los términos especificados en el ensayo normalizado correspondiente.

El objetivo del reglamento es reducir los riesgos a límites aceptables, no su (imposible) eliminación y proteger a los usuarios de los edificios, a los que se define en términos más amplios que a los ocupantes. Para ello, entre otras medidas, el reglamento establece condiciones a los productos, elementos constructivos y de diseño que limiten el riesgo en la propagación interior y exterior del fuego.

Los edificios así se compartimentarán en sectores de incendio y se limitará la reacción al fuego de los elementos constructivos. La limitación de clase de reacción al fuego de los elementos constructivos depende de la situación del

elemento y es distinto si se trata de un revestimiento de techos y paredes o de suelos.

En general los PCM orgánicos por su inflamabilidad tienen limitaciones en su uso en el edificio y habrá que protegerlos adecuadamente.

En cualquier caso la estrategia de integración de este tipo de materiales consiste en:

- Protección del PCM mediante recubrimientos superficiales no combustibles
- Protección mediante encapsulado del PCM dando un producto distinto
- Cambio de propiedades del producto mediante la utilización de aditivos inifugantes o retardantes.
- Inclusión de PCM en elementos con menores exigencias

(Salyer y otros, 1985) estudiaron la utilización de aditivos retardantes, generalmente compuestos orgánicos halogenados. Para la inclusión en paramentos se ha estudiado la realización de tratamientos secuenciales del yeso, primero se aplica una impregnación de PCM y luego un líquido insoluble ignífugo. Este último desplaza parte del PCM y otra parte permanece en la superficie. El resultado es un yeso autoextinguible. También el uso del hexadecano bromado y octadecano como PCM. Cuando estos compuestos halogenados se combinan con el óxido de antimonio del yeso, el producto se convierte en autoextinguible. El mayor problema existe para los PCM orgánicos dado que algunas pruebas han demostrado que no cumplen con todos los requisitos para ser utilizados en los edificios (Banu y otros, 1998).

Koschenz y Lehmann (Koschenz y Lehmann, 2004) desarrollaron un panel de techo que incorpora parafina microencapsulada en una cama de yeso cubierta por una bandeja de chapa de acero que garantiza un cierto nivel de resistencia al fuego. El sistema se incorpora en el nuevo edificio administrativo de BASF AG, "Ludwigshafener Wohnungsunternehmen LUWOGÉ /GEWOGÉ". Debido al tipo de uso de los espacios y a la provisión de un sistema de rociadores, el sistema cumple con los requisitos de la normativa alemana contra incendios.

Otros trabajos de interés sobre el comportamiento al fuego de materiales de construcción que incorporan PCM y adición de retardantes de llama han

sido evaluados por (Fernández~Lladó, 2013).

La inclusión de PCM en los elementos constructivos puede afectar a la sectorización cuando se introducen en cámaras o espacios que puedan atravesar sectores distintos del edificio. Las limitaciones no lo convierten en inviable dado que pueden disponerse dispositivos de obturación intumescente; lo que presenta el inconveniente de incrementar el precio de los sistemas.

En el caso de fachadas la limitación en general es B-S3,d2. Esta limitación es aplicable a edificios de más de 18 *m.* de altura y para los 3, 5 *m.* accesibles desde la calle en edificios que no estén dentro de una parcela privada. En general la cámara debe limitarse a 10 *m* de desarrollo vertical para mitigar el riesgo de la propagación exterior.

### 3.2.3.7. Productos comerciales de aplicación en edificación

En la Tabla 3.4 se muestra una relación de productos utilizados en la edificación. Los productos comerciales se presentan en la Tabla 3.5. Una completa descripción de materiales de cambio de fase se recoge en (Cabeza y otros, 2011) y en (Haghighat y otros, 2013).

Tabla 3.4: Propiedades térmicas de los PCM candidatos para aplicación en la edificación

PCM	Punto de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Referencia
Agua/hielo	0	334	
PCM Inorgánico			
KF·4H <sub>2</sub> O Potassium fluoride tetrahydrate	18.5-19	231	(Abhat, 1983), (Khudhair y Farid, 2004), (Tyagi y Buddhi, 2007), (Naumann y Emons, 1989)
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O Calcium chloride hexahydrate	29.7	171	(Khudhair y Farid, 2004), (Dinçer y Rosen, 2010), (Tyagi y Buddhi, 2007), (Lane, 1980)
Mn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	25.8	125.9	(WADA y otros, 1984), (Tyagi y Buddhi, 2007)
LiNO <sub>3</sub> ·3H <sub>2</sub> O	30	296	(Tyagi y Buddhi, 2007)
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O	32	251	(Abhat, 1983), (Hawes y otros, 1993), (Tyagi y Buddhi, 2007), (Naumann y Emons, 1989)
66.6 % CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 33.3 % MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O 48 % CaCl <sub>2</sub> 4.3 % NaCl 0.4 % KCl	25	127	(Tyagi y Buddhi, 2007)
47.3 % H <sub>2</sub> O 47 % Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	26.8	188	(Abhat, 1983), (Tyagi y Buddhi, 2007)

PCM	Punto de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Referencia
53 % $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136	(Abhat, 1983), (Tyagi y Buddhi, 2007)
60 % $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	30	200.5	(Tyagi y Buddhi, 2007), (Li y otros, 1991)
40 % $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$			
PCM Orgánico			
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$ Butyl stearate	18-23	140	(Khudhair y Farid, 2004), (Hawes y otros, 1993), (Tyagi y Buddhi, 2007)
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OH}$ Dodecanol	17.5-23.3	188.8	(Khudhair y Farid, 2004)
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$ Tech. Grade octadecane	22.5-26.2	205.1	(Khudhair y Farid, 2004)
$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOC}_3\text{H}_7$ Propyl palmitate	16-19	186	(Khudhair y Farid, 2004)
45 % $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	17-21	143	(Khudhair y Farid, 2004), (Hawes y otros, 1993), (Tyagi y Buddhi, 2007)
55 % $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$			
45/55 Capric-lauric acid			
Paraffin $\text{C}_{16}\text{-C}_{18}$	20-22	152	(Tyagi y Buddhi, 2007), (Zalba y otros, 2004)
Dimethyl sabacate	21	120	(Tyagi y Buddhi, 2007), (Feldman y otros, 1986)
Polyglycol E 600	22	127.2	(Dinçer y Rosen, 2010), (Tyagi y Buddhi, 2007), (Lane, 1980)
Paraffin $\text{C}_{13}\text{-C}_{24}$	22-24	189	(Abhat, 1983), (Tyagi y Buddhi, 2007)
34 % Miristic acid	24	147.7	(Tyagi y Buddhi, 2007), (Lane, 1980)
66 % Capric acid			
1-Dodecanol	26	200	(Hawes y otros, 1993), (Tyagi y Buddhi, 2007)
Paraffin $\text{C}_{18}$ (45-55 %)	28	244	(Abhat, 1983), (Tyagi y Buddhi, 2007)
Vinyl stearate	27-29	122	(Tyagi y Buddhi, 2007), (Feldman y otros, 1986)
Capric acid	32	152.7	(Dinçer y Rosen, 2010), (Tyagi y Buddhi, 2007), (Lane, 1980)

Tabla 3.5: PCMs comerciales de uso en edificación.

NombrePCM	Tipo de Producto	Punto de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Fuente	Referencia
Latest <sup>TM</sup> 20T	Inorganic salt	19-20	175	TEAP	(www.teappcm.com, 2013)
ES21	-	21	150	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
DS 5030	Dispersion	21	51	BASF	(www.micronal.de, 2013)
DS 5029	Pulver	21	125	BASF	(www.micronal.de, 2013)
A22	-	22	172	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
RT 20	Paraffin	22	130	Rubitherm GmBH	(www.rubitherm.de, 2013)
SP 22 A4	Salt hydrate	22	165	Rubitherm GmBH	(www.rubitherm.de, 2013)
Climsel C22	Salt hydrate	22	216	Climator	(www.climator.com, 2013)
A23	-	23	170	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
E23	-	23	155	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
Climsel C 23	Salt hydrate	23	148	Climator	(www.climator.com, 2013)
DS 5007	Dispersion	23	55	BASF	(www.micronal.de, 2013)
DS 5008	Pulver	23	135	BASF	(www.micronal.de, 2013)
Climsel C24	Salt hydrate	24	108	Climator	(www.climator.com, 2013)



Nombre PCM	Tipo de Producto	Punto de fusión (°C)	Calor latente (kJ/kg)	Fuente	Referencia
TH 24	Salt hydrate	24	45.5	TEAP	(www.teappcm.com, 2013)
DC-24	Salt hydrate	24	158	Dörkern	(www.cosella-dorken.com, 2013)
A25	-	25	172	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
E25	-	25	167	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
SP 25 A8	Salt hydrate	25	180	Rubitherm GmbH	(www.rubitherm.de, 2013)
Latest <sup>TM</sup> 25T	Inorganic salt	24-26	175	TEAP	(www.teappcm.com, 2013)
RT 25	Paraffin	25	131	Rubitherm GmbH	(www.rubitherm.de, 2013)
RT 26	Paraffin	26	232	Rubitherm GmbH	(www.rubitherm.de, 2013)
DS 5000	Dispersion	26	59	BASF	(www.micronal.de, 2013)
DS 5001	Pulver	26	145	BASF	(www.micronal.de, 2013)
E27	-	27	180	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
STL 27	Salt hydrate	27	213	Mitsubishi chemical	(Tyagi y Buddhi, 2007), (H, 2002)
S27	Salt hydrate	27	207	Cristopia	(Tyagi y Buddhi, 2007), (www.cristopia.com, 2013)
AC 27	Salt hydrate	27	207	Cristopia	(www.cristopia.com, 2013)
RT 27	Paraffin	28	179	Rubitherm GmbH	(www.rubitherm.de, 2013)
A28	-	28	245	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
PX 27	Paraffin	28	112	Rubitherm GmbH	(www.rubitherm.de, 2013)
RT 27	Paraffin	28	179	Rubitherm GmbH	(Tyagi y Buddhi, 2007), (www.rubitherm.de, 2013)
GR 27	Paraffin	28	72	Rubitherm GmbH	(www.rubitherm.de, 2013)
Climsel C28	Salt hydrate	28	126	Climator	(www.climator.com, 2013)
TH 29	Salt hydrate	29	188	TEAP	(Tyagi y Buddhi, 2007), (www.teappcm.com, 2013)
Latest <sup>TM</sup> 29T	Inorganic salt	28-30	175	TEAP	(www.teappcm.com, 2013)
E30	-	30	201	EPS	(www.epsLtd.co.uk, 2013)
RT 31	Paraffin	31	168	Rubitherm GmbH	(Tyagi y Buddhi, 2007), (www.rubitherm.de, 2013)
Climsel C32	Salt hydrate	32	194.4	Climator	(Tyagi y Buddhi, 2007), (www.climator.com, 2013)
Latest <sup>TM</sup> 32S	Inorganic salt	31-32	200	TEAP	(www.teappcm.com, 2013)

Los principales fabricantes son:

RUBITHERM (www.rubitherm.de), CRISTOPIA (www.cristopia.com), TEAP (www.teappcm.com), DOERKEN (www.doerken.de), Mitsubishi Chemical Corporation (www.m-kagaku.co.jp), Climator (www.climator.com), EPS Ltd (www.epsLtd.co.uk) y BASF (www.micronal.de).

### 3.2.3.8. Determinación experimental de las propiedades mediante ensayos

Se han realizado varios trabajos para ensayar las propiedades térmicas de los PCMs ((Naumann y Emons, 1989), (Speyer, 1994), (Eckert y otros, 1994), (Zalba, 2002), (Kondo y Ibamoto, 2003), (Takeda y otros, 2004), (Turnpenny y otros, 2000), (Inaba y Tu, 1997)).

Los más usuales son:

- DDC “Diferencial Drop Calorimetry”, (Marcus y otros, 2003) (Calorimetría diferencial de caída). Requiere extensos ensayos y los resultados no son muy exactos (Lane, 1989).
- DSC “Differential Scanning Calorimetry” calorimetría de exploración diferencial, y DTA “differential thermal analysis” análisis térmico diferencial. Este método es usado por varios autores (Gibbs y Hasnain, 1995), (Flaherty, 1971), (Cantor, 1978), (Elder, 1980), (Arbanas y otros, 1989), (Dunn y otros, 1984), (Aboul-Enein y Olofa, 1991), (Takahashi y otros, 1991), (Babich y otros, 1992), (Richardson, 1993), (Feldman y Banu, 1996), (Li y otros, 1999), (Liu y Chung, 2001), (Shilei y otros, 2006a), (Castellón y otros, 2008)). Requiere una sustancia de referencia y consiste en suministrar calor a la muestra y a la referencia a una tasa uniforme. Se requiere instrumentación especializada.
- T-history, una técnica nueva desarrollada por (Yinping y otros, 1999). Consiste en analizar los gráficos de temperatura-tiempo de tal manera que las propiedades son evaluadas por comparación con otros materiales de referencia (normalmente el agua pura). La exactitud no es muy buena, pero suele ser suficiente para las aplicaciones en la edificación. Su principal ventaja es que es el método más sencillo.

Algunas mejoras al método T-history han sido propuestas por (Hong y otros, 2004), (Marín y otros, 2003) y (Lázaro y otros, 2006b).

## 3.3. Utilización de materiales de cambio de fase en edificación

Realmente existe poca experiencia real en la utilización de materiales de cambio de fase en edificación. Las estrategias responden a la necesidad de disminuir demanda y consumo y dependen de los tipos constructivos, materiales

y localización del edificio. Estas pueden orientarse a calefacción, refrigeración o ambas y pueden centrarse en la integración de los materiales PCM bien formando parte de los elementos constructivos (integrados en su composición o como elementos adosados) o bien como parte del sistema de climatización.

La aplicación de materiales de cambio de fase para el almacenamiento estructural puede perseguir el objetivo de satisfacer el 100 % de la demanda en determinadas circunstancias o bien combatir una parte del consumo.

En este capítulo se tratan algunas de las aplicaciones de los PCMs en la edificación y su estado de desarrollo. Algunas de estas técnicas se describen en ((Tyagi y Buddhi, 2007), (Zhang y otros, 2007), (Pasupathy y otros, 2008b), (Casol, 2009)).

Existen experiencias de integración en la superficie de elementos constructivos (Pino y Lizarraga, 2013), en las que se muestran las dificultades de la integración debidas a la activación del material y se pone en cuestión la viabilidad debido al coste sobre todo en vivienda social.

### 3.3.1. Introducción

Al igual que la inercia térmica de los edificios, la utilización de PCM muestra su utilidad como medio de disminuir el consumo del edificio bien por el mejor aprovechamiento del medio ambiente como fuente o sumidero de energía bien por el aprovechamiento de energías residuales o por el desplazamiento de la carga punta teniendo un efecto positivo sobre la eficiencia energética.

La integración de materiales PCM en edificación es diferente si se consideran estos materiales como parte de los sistemas de climatización del edificio o como parte del edificio. En ambos casos el material PCM actúa como un elemento de almacenamiento de energía térmica pero por cómo se hace la integración y por su funcionamiento, su utilización es totalmente diferente.

Esta diferenciación es más bien conceptual y se basa en considerar el material PCM como elemento de almacenamiento que forma parte del sistema de acondicionamiento a diferencia de considerar el material como parte de los sistemas constructivos del edificio. En este segundo caso el funcionamiento puede ser totalmente pasivo o requerir de un elemento auxiliar para el transporte de la energía térmica.

### 3.3.2. Integración de PCM en los sistemas de climatización

El objeto del almacenamiento de la energía es separar temporalmente la demanda energética del momento en el que se produce la acumulación. La inercia térmica puede modificar la carga punta de la refrigeración reduciendo su valor y desplazando su aparición a horas que por ejemplo corresponden a un consumo eléctrico valle (Neeper, 1990), (Stovall y Tomlinson, 1995), (Stetiú y Feustel, 1996). Pudiendo ejercer un efecto de aumento de la eficiencia energética.

Nagano (Nagano y otros, 2006) estudió un sistema de aire acondicionado utilizando materiales de cambio de fase (fusión a 20 ° C) para aumentar la capacidad de almacenamiento térmico. Los resultados de las mediciones, simulando las condiciones operacionales de un edificio de oficinas, mostraron que el 89 % de la carga diaria de enfriamiento podría ser almacenada durante la noche con un sistema “packed bed of granular PCM” (PCM granular embebido) de 30 mm de espesor. Sin embargo, se presentó un deterioro en el control de la temperatura de los espacios. Los autores afirman que esto puede ser mejorado mediante la variación del caudal de aire en función de la carga de refrigeración.

Existen experiencias españolas de aprovechamiento de materiales de cambio de fase en climatización, (Domínguez y García, 2009), en los que se han estudiado de forma satisfactoria como elementos de aprovechamiento de frío gratuito (freecooling) y mediante sistemas evaporativos. También se han estudiado para diversos usos tales como en los invernaderos de uso agrícola. (Domínguez~Alonso y otros, 2010).

#### 3.3.2.1. Ventilación nocturna con PCM

La alta demanda de energía debida a las cargas de enfriamiento se puede reducir mediante el frío de la noche. El sistema de refrigeración gratuita consiste en almacenar el frío durante la noche, cuando las temperaturas son más bajas, y que se utilice durante el día para enfriar el aire de entrada al edificio. Este concepto ha sido estudiado por diversos autores ((Zalba y otros, 2004), (Zalba, 2002), (Kondo y Ibamoto, 2003), (Takeda y otros, 2004), (Turnpenny y otros, 2000)) Zalba y otros ((Zalba y otros, 2004) y (Zalba, 2002)). Zalba

diseño y construyó una instalación, para verificar el funcionamiento del PCM en un sistema con refrigeración gratuita. Se determinaron los parámetros más influyentes con medios teóricos para llevar a cabo la fase experimental. Con el modelo empírico desarrollado en este trabajo, un sistema real de enfriamiento fue diseñado y evaluado económicamente.

Para simular el comportamiento de un sistema de refrigeración gratuita se han desarrollado modelos numéricos utilizando el método de los volúmenes de control y de la entalpía, así como el método diferencial normalizado. La validación con resultados experimentales mostró un buen nivel de aproximación (Stritih y Butala, 2007).

Arkar y otros ((Arkar y otros, 2007), (Arkar y otros, 2005)) investigaron la eficacia de la refrigeración gratuita en un edificio masivo y otro ligero. Para ello se utilizó un sistema de ventilación mecánica con dos sistemas de almacenamiento de calor latente, uno para enfriar el suministro de aire fresco y el otro para el aire de recirculación. El sistema de almacenamiento consistía de PCM encapsulado en esferas. Se desarrolló un modelo numérico que fue validado con los experimentos realizados. Los resultados mostraron el potencial de la refrigeración gratuita con PCM para reducir el tamaño de los sistemas de ventilación mecánica, permitiendo un mayor confort además de mejorar las condiciones del aire fresco.

Otras experiencias propuestas (Sharma y otros, 2009), en la misma línea tratan de reducir consumos y los picos de energía. El PCM se incluye en los techos formando parte del edificio y para el funcionamiento se requiere un sistema mecánico.

### **3.3.2.2. Calefacción/Refrigeración por suelo radiante y PCM**

Una nueva propuesta es el uso del suelo para el suministro de aire acondicionado con sistema de almacenamiento de calor latente. La idea principal es similar a la de la refrigeración gratuita pero utilizando diferentes partes del edificio ((Takeda y otros, 2003), (Pluta, 2003)). Esta idea fue desarrollada por Takeda (Takeda y otros, 2003). El frío se almacena en la estructura y el PCM durante la noche. El PCM granulado en partículas con un diámetro de alrededor de 3 mm, se incorporó a pocos centímetros bajo la superficie. El PCM es poroso e intercambia calor con el aire directamente.

Nagano propuso un sistema de acondicionamiento para edificios de oficina

basado en la disposición de una cama de PCM en el suelo (Nagano y otros, 2006), los resultados obtenidos hablan de conseguir una compensación del 89 % de las cargas de refrigeración.

Zhang y otros ((Lin y otros, 2005), (Lin y otros, 2004)) estudiaron experimental y numéricamente un sistema de calefacción eléctrica de suelo radiante con PCM en placas de forma estabilizada. También desarrollaron un modelo para simular el comportamiento del suelo con el PCM para absorber el calor de la radiación solar durante el día y su liberación durante la noche para la estación con necesidad de calefacción (Xu y otros, 2005).

El modelo fue validado con los resultados experimentales obtenidos en una celda de ensayo mostrando un buen nivel de concordancia. El modelo fue utilizado en un estudio paramétrico para concluir que:

- I. la temperatura de fusión adecuada para el PCM es aproximadamente igual a la temperatura media del aire en el interior para los días soleados de invierno,
- II. el calor latente de fusión y la conductividad térmica del PCM debe ser mayor a 120 kJ y 0,5 W/m·K,
- III. el espesor de la placa de PCM de forma estabilizada no debe ser superior a 20 mm, y
- IV. el espesor de la capa de aire entre las placas de PCM y el suelo debe ser lo más pequeño posible.

(Barrio y otros, 1992) probaron sistemas de almacenamiento con PCM con cambio de fase (sólido-sólido). El material, neopentylglycol (NPG) presenta una transición reversible de cristalino a amorfo. La transformación es endotérmica a 39°C y exotérmica a 34°C. Este sistema puede usarse como elemento de estabilización térmica de suelos radiantes para evitar los picos de consumo.

### 3.3.3. Integración de PCM en el edificio

Existen muchas referencias de casos de integración de PCM en edificios. En la construcción tradicional española la estabilidad térmica a través de la inercia es algo normal. Sin embargo en otras partes del mundo con construcción mucho más ligera esto no es así. En ambos casos el PCM constituye una

alternativa para disminuir el pico de consumo y para estabilizar térmicamente el edificio.

Wang, (Wang y otros, 2009) presenta una revisión del uso de PCM en la envuelta de los edificios. La integración tiene el objetivo de tanto del comportamiento solar pasivo como elemento de calefacción, activo como complemento a sistemas o mediante refrigeración nocturna. Se aplica a muros techos y suelos. Figura 3.5.

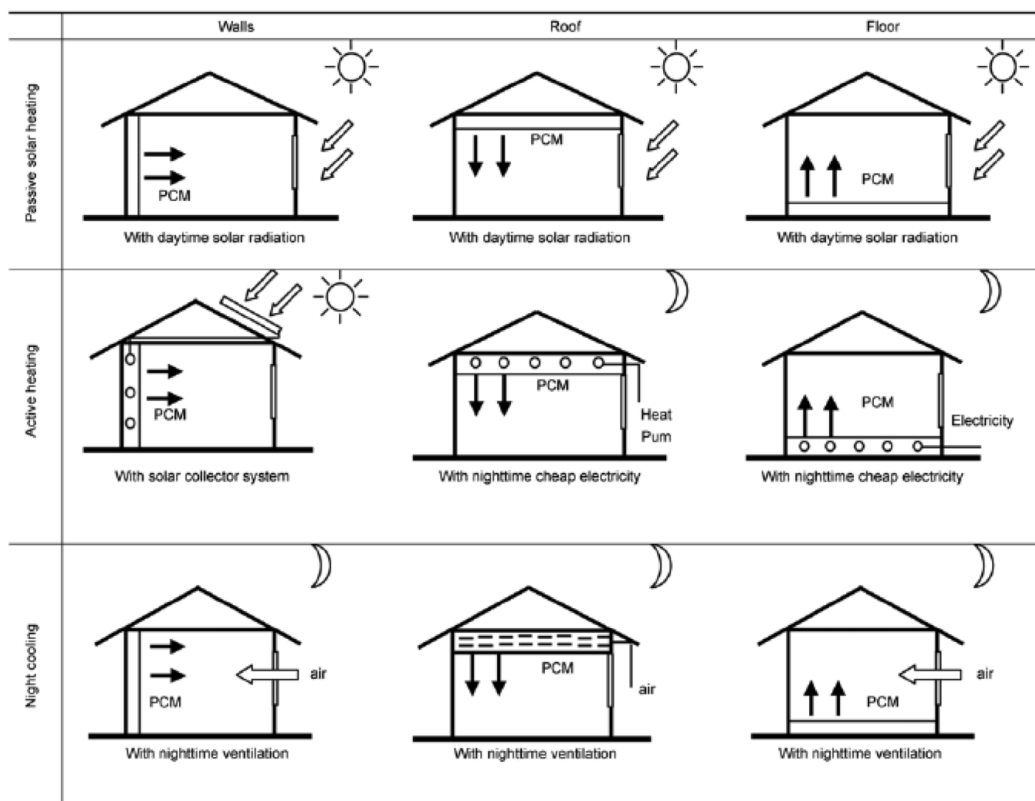


Figura 3.5: Aplicaciones de PCM en la envolvente edificatoria. (Wang y otros, 2009)

En (Neeper, 2000) se analizaron mediante un modelo de capacidad los paneles de yeso que incluían PCM como método de estabilización térmica. El trabajo examinaba tres parámetros que son fundamentales para tener en cuenta la absorción de energía diaria: la temperatura de fusión, el rango en el que se produce y la capacidad de calor latente por unidad de área. La

transferencia térmica la modelaron a través de un único coeficiente  $h$ .

Como primeras experiencias Halford y Boehm (Halford y Boehm, 2007) estudiaron la capacidad de modificación de la carga punta de refrigeración mediante el uso de PCM encapsulado en el falso techo o en el aislamiento de los muros en una configuración en la que el PCM se encuentra entre dos capas de aislamiento esta configuración es llamada RCR (resistencia, capacidad, resistencia).

Ellos desarrollaron un modelo simplificado basado un método numérico explícito de diferencias finitas. Cuando el PCM se encuentra en una sola fase, el sistema se regía por la ecuación de difusión de calor, y cuando se encuentran en dos fases por la condición de Stefan. Los resultados mostraron que es teóricamente posible modificar de manera importante la carga de refrigeración. Dependiendo del rango de temperatura de la pared interna, la reducción máxima de la carga máxima es de aproximadamente 11-25 % en comparación con el mismo sistema pero sin cambio de fase, y alrededor de 19-57 % en comparación con un sistema convencional. La simulación demostró que la eficacia del material está limitada por la solidificación.

Zhang y otros (Zhang y otros, 2005) desarrollaron un muro prefabricado térmicamente mejorado utilizando materiales de cambio de fase para reducir la demanda punta de aire acondicionado en edificios residenciales. El método de macro-encapsulación redujo la inflamabilidad de la pared y eliminó el problema de transferencia de humedad a través de la envuelta. Los resultados experimentales mostraron que los flujos de calor máximo se redujeron sustancialmente (hasta un 38 % de reducción), así como la carga de refrigeración (del 8,6 % al 10,8 %). La curva de carga se suavizó y la humedad relativa del aire en el interior no aumentó.

#### **3.3.3.1. Enlucidos impregnados con PCM**

Feldman y otros (Scalat y otros, 1996) probaron un muro con PCM a tamaño real. Para ello utilizaron dos habitaciones idénticas; una con un muro con enlucido de yeso normal y otra con una pared de yeso impregnado con PCM. El PCM se componía de un 50 % butil estearato y un 48 % palmitato de butilo. Los resultados mostraron que la habitación con PCM presentaba un mejor comportamiento térmico tanto para calefacción como para refrigeración. También se midió la calidad del aire en relación con los compuestos orgánicos volátiles habiéndose encontrado que los resultados eran similares en las dos habitaciones.



En 1997 Athienitis (Athienitis y otros, 1997) estudió experimentalmente y numéricamente el comportamiento del PCM embebido en yeso en una celda de ensayo exterior. El PCM (estearato de butilo) contenido en el yeso correspondía al 25 % del peso. Ellos demostraron que el uso de la placa de yeso impregnada con PCM puede reducir la temperatura máxima del aire interior unos  $4^{\circ}\text{C}$  durante el día y aumentar la temperatura de la superficie de la pared en la noche  $1.5^{\circ}\text{C}$  durante el proceso de fusión (7-11 horas). Estos efectos pueden reducir significativamente la carga de la calefacción por la noche. Fang y Zhang (Fang y Zhang, 2006) desarrollaron un nuevo material compuesto por una mezcla de un PCM orgánico con una montmorillonita modificada orgánicamente. Fabricaron y probaron varias placas de yeso con PCM en celdas de (70 x 70 x 70 mm), cinco caras estaban compuestas por yeso convencional y una, la de la parte superior, de yeso impregnado con PCM, en concentraciones de 0 %, 20 % y 50 %. Los resultados mostraron una reducción de la temperatura interior máxima con el uso de los PCM ( $40^{\circ}\text{C}$  en la celda sin PCM,  $35^{\circ}\text{C}$  en la celda con 20 % de PCM y  $31^{\circ}\text{C}$  en la de 50 %).

Un nuevo enfoque para incorporar PCM en el enlucido fue estudiado por Schossig y otros (Schossig y otros, 2005). Ellos desarrollaron un micro-encapsulado de PCM, que permite una fácil aplicación, buena transferencia de calor y no requiere un sistema que lo proteja de daños en su superficie. Realizaron un montaje experimental para probar dos PCM diferentes. En los resultados se encontró un retraso de una hora en la ocurrencia de la temperatura punta, y un aumento del confort térmico. La principal limitación del sistema es la descarga del calor del PCM en la noche.

(Oliver y otros, 2010) estudiaron la caracterización térmica de placas de yeso con material de cambio de fase incorporado, comprobando el incremento de energía térmica acumulada para un reducido espesor.

Ahmad y otros, (Ahmad y otros, 2006a) estudiaron experimentalmente el comportamiento de muros con tres tipos de enlucidos que contienen PCM.

- un panel de policarbonato relleno con parafina granulada,
- un panel de policarbonato relleno con polietilenglicol PEG 600;
- un panel de PVC relleno con PEG 600 acoplado a un panel de aislamiento vacío (VIP vacuum insulation panel)

En el primer caso, la baja conductividad térmica redujo el calor almacenado durante la operación. Este problema se resolvió para el segundo caso, pero aparecieron algunos problemas estructurales a causa del proceso de fusión (aparecieron grietas en el panel). Por último, la estabilidad estructural se logró mediante el uso de PEG y paneles VIP. Se utilizó y validó un modelo numérico. El sistema fue probado en una celda de ensayo lográndose un buen almacenamiento de energía solar con una alta reducción de la temperatura interior (Ahmad y otros, 2006b).

Otro ejemplo fue la inclusión de PCM en el enlucido de yeso para las condiciones climáticas de invierno en China. (Shilei y otros, 2006b) comprobaron experimentalmente la estabilización térmica.

### 3.3.3.2. Hormigón con PCM

La impregnación de PCM en hormigón se propone como una solución al cambio de fase incongruente (aparición de fases de composición diferente a la del PCM original) (Hawes y Feldman, 1992)

Los beneficios de la utilización de PCM en hormigón dependen de la cantidad de PCM absorbido. Es muy importante la estabilidad del PCM en el hormigón a lo largo de su vida útil. Por ello, se han puesto a prueba varios materiales de cambio de fase y se han ensayado modificaciones al hormigón del PCM ((Hawes y otros, 1992), (Hadjieva y otros, 2000), (Cabeza y otros, 2007)).

Lee y otros (Lee y otros, 2000) presentaron los resultados de la comparación entre el rendimiento de almacenamiento térmico de bloques de hormigón ordinarios y los que han sido impregnados con dos tipos de PCM: estearato de butilo y de parafina.

El uso de bloques de hormigón impregnados con PCM fue también estudiado por Khudair (Kuznik y otros, 2011). En este estudio se impregno con parafina RT20: yeso, hormigón y agregados de piedra pómez. Mediante mediciones y simulaciones se mostraron que los PCM logran suavizar la fluctuación diaria de temperatura del aire interior manteniendo las condiciones de confort. Los materiales PCM pueden ser instalados con las mismas técnicas y equipos utilizados para materiales de construcción convencionales.

Referencias similares se encuentran en (Behzadi y Farid, 2010), (Zhou y

otros, 2012)

Otra técnica consiste en introducir directamente el PCM en los huecos de los bloques de construcción. Salyer et al. (Salyer y otros, 1978) desarrollaron algunos métodos para contener el PCM y los aplicaron a bloques de construcción huecos. También desarrollaron una nueva composición (K-18/HDPE/EVA/ABS mezcla-fundida) (Salyer y otros, 1995) que puede ser mezclada mecánicamente para formar pellets secos que contienen PCM. Se demostró que en los huecos de los bloques de hormigón se pueden introducir una gran cantidad de pellets PCM/HDPE, PCM/sílice en polvo, o PCM-fundida, lo que resulta en un gran almacenamiento térmico.

Lamberg (Lamberg y otros, 2000) estudió numéricamente el efecto de la inclusión de PCM en el hormigón de la estructura y sobre elementos de hormigón (ACO: aggregate concrete elements) en las condiciones climáticas de Helsinki y Lisboa. Los resultados mostraron que es necesaria la ventilación nocturna para mejorar la débil transferencia de calor entre la estructura y el aire. El efecto del PCM fue mas acentuado para el caso de Lisboa que para el de Helsinki. Castellón (Castellón, 2008) determinó experimentalmente los beneficios de un nuevo composite, la mezcla Micronal® de BASF, con hormigón. El estudio, en el marco del proyecto europeo MOPCON, demostró que se pueden conseguir mejoras, reduciendo la temperatura hasta 4°C . Ibáñez (Ibáñez y otros, 2005) estudió numéricamente el comportamiento de dicho PCM y sus resultados fueron validados experimentalmente.

### 3.3.3.3. Tablero de Madera-cemento con PCM

El tablero de madera-cemento (Wood-lightweight-concrete) es un tipo de tablero aglomerado consistente formado por una mezcla de cemento, fibra de madera, agua y aditivos. Tiene ventajas, como buen aislamiento térmico (entre 0,15 y 0,75 W/m·K), aislamiento acústico, buenas propiedades mecánicas (densidad entre 600 y 1700 kg/m<sup>3</sup>), pero un calor específico entre 0,39 y el 0,48 kJ/kg·K. Se utiliza en la construcción de paredes interiores y exteriores de edificios de viviendas.

Mehling y otros (Mehling y otros, 2002) estudiaron la inclusión de PCM en el tablero de madera-cemento, con la idea aumentar la capacidad de almacenamiento térmico y obtener elementos de pared más ligeros y delgados con un mejor rendimiento térmico. El PCM elegido fue el Rubitherm granulado GR 40, 1 - 3 mm, y GR 50, 0,2 - 0,6 mm. Se probaron mezclas de 20 %

de madera sustituida por parafina y mezclas con 20 % de PCM adicional. Llegaron a la conclusión de que es viable la inclusión de PCM sin que las propiedades mecánicas varíen significativamente.

#### **3.3.3.4. Panel sándwich con PCM**

Los paneles sandwich son una solución muy extendida en edificios industrializados ligeros. Su uso mayoritario es en cubiertas pero también pueden usarse en fachada. Uno de los problemas existentes es el sobrecalentamiento en condiciones de verano. El PCM puede aliviar estos problemas de sobrecalentamiento. Los paneles sándwich se carecen de inercia térmica por su ligereza, la adición de PCM la aumenta y puede permitir que absorba el calor.

Diferentes prototipos de paneles sándwich con PCM han sido probados y simulados. Los resultados demostraron un buen comportamiento y una gran mejora cuando se añade una capa de aire entre el PCM y el exterior (Carbonari y otros, 2006).

Castellón estudió el efecto de la adición de materiales de cambio de fase microencapsulados en paneles sandwich. Comprobaron tres métodos para la adición del PCM, en primer lugar sin cambiar el método de fabricación del panel introduciéndolo en uno de los componentes y dos introduciendo el PCM antes o después de incluir el poliuretano en el panel. En el primero de los casos encontraron un incremento en la conductividad térmica del panel, en los otros casos un incremento de la inercia térmica sin un aumento de peso. (Castellón y otros, 2010).

#### **3.3.3.5. Ladrillos con PCM**

Alawadhi (Alawadhi, 2008) estudió numéricamente el comportamiento de un ladrillo-PCM para climas cálidos (Kuwait). Para la investigación, el PCM se introdujo en los orificios cilíndricos de los ladrillos, en diferentes cantidades, materiales y posiciones. El modelo utilizado fue bidimensional y resuelto con el método de elementos finitos. Para evaluar la eficacia se comparó el flujo de calor interno en el ladrillo-PCM con el ladrillo convencional. Los resultados mostraron una reducción del flujo de calor de hasta el 24,2 % cuando se utiliza la mejor configuración. Un aumento en la cantidad PCM mejoró el resultado, siendo la mejor ubicación, el centro del ladrillo. En la recopilación de trabajos realizada por Soares (Soares y otros, 2013) se describen otras

experiencias recientes de incorporación de PCM a los ladrillos. Figura 3.6



Figura 3.6: Ladrillos con PCM. (Soares y otros, 2013)

#### 3.3.3.6. Ventanas con PCM

Con el fin de reducir la ganancia solar en los edificios, y/o reducir las pérdidas y ganancias por transmisión de calor, Ismail y otros (Ismail y otros, 2008) (Ismail y Henríquez, 2001) (Ismail y Henríquez, 1995) (Ismail y Henríquez, 2002) han estudiado la posibilidad de utilizar PCM en la cámara de los vidrios dobles (la capa de aire puede ser llenada con PCM). Los resultados muestran reducciones tanto en las ganancias solares y la transmisión de calor sin afectar de manera importante la radiación visible.

Con una idea similar, Merker y otros (Merker y otros, 2002) desarrollaron un sistema de sombreado con PCM para evitar los sobrecalentamientos alrededor de la ventana.

Buddhi y Sharma (Buddhi y Sharma, 1999) midieron la transmitancia a la radiación solar de un PCM (Ácido esteárico) a diferentes temperaturas y espesores. Encontraron que la transmisividad a la radiación solar del material de cambio de fase es superior a la del vidrio y propusieron una nueva aplicación para los materiales de cambio de fase en muros/ventana a manera de aislamiento transparente.

El PCM también se ha integrado en persianas al ser elementos adyacentes a los huecos, (Sharma y otros, 2009), figura 3.7.



Figura 3.7: PCM en persianas. (Sharma y otros, 2009)

#### 3.3.3.7. Cubiertas con PCM

Koschenz y Lehmann (Koschenz y Lehmann, 2004) estudiaron el desarrollo de un panel de falso techo térmicamente activado para su incorporación en edificios rehabilitados. El sistema consiste en PCM microencapsulado en enlucido de yeso. Esta mezcla se encierra entre dos chapas de acero y un sistema de tubos capilares de agua se utiliza para un control activo de la masa térmica. Desarrollaron un modelo numérico para el cálculo del comportamiento térmico. El modelo se basa en el método de las diferencias-finitas y el método Nicolson Manivela e integrado en TRNSYS. El modelo predice algunos de los requisitos para el límite máximo: 5 cm de espesor del panel, una concentración de 25 % en peso de PCM en el yeso y una conductividad térmica de 1,2 W/m·K (conseguido mediante el uso de aletas de aluminio). La validación del modelo experimental, con pruebas realizadas en el laboratorio mostró un buen nivel de concordancia.

Un sistema similar fue estudiado por Pasupathy y otros (Pasupathy y otros, 2008a). Ellos estudiaron experimental y numéricamente el comportamiento de un PCM inorgánico eutéctico incorporado en el techo.

Se probaron diferentes casos:

- I. con un PCM de espesor de 2,5 cm,
- II. con 3 cm de espesor
- III. el PCM refrigerado con agua.

Para el primer caso, la introducción del PCM ayudó a conseguir una temperatura constante en el techo durante los meses de diciembre a abril, pero tuvo un efecto negativo en los meses de mayo a noviembre. La utilización de más PCM no mejoró el sistema, porque el material no se alcanzaba a enfriar durante la noche. El sistema funcionó correctamente, pero la cantidad necesaria de agua fría durante los períodos de verano no era de fácil acceso.

Saman estudió el comportamiento del PCM integrado con instalaciones de energía solar para calefacción (Saman y otros, 2005). Alawadhi estudió la incorporación de elementos cónicos en el tejado para reducir las cargas de refrigeración (Alawadhi y Alqallaf, 2011) con reducciones apreciables, Pasupathy estudio el efecto de incorporar capas de PCM en cubiertas (Pasupathy y Velraj, 2008) con el mismo efecto y Kosny estudió con resultados excelentes las cubiertas con cámaras de aire ventiladas con PCM como elementos capaces de funcionar como sumideros térmicos disminuyendo de forma apreciable la temperatura de las mismas (Košny y otros, 2012).

#### **3.3.3.8. Muros con PCM**

Se ha estudiado experimentalmente la estabilización térmica que supone la inclusión de PCM en el interior de muros interiores. (Kuznik y otros, 2008) realizaron modelos que comprobaron experimentalmente con éxito. Estas experiencias pueden ser interesantes por reducir la temperatura superficial de las paredes lo que influye en el confort térmico mejorando la estratificación del aire.

#### **3.3.3.9. Muro Trombe con PCM**

Tradicionalmente, los muros Trombe funcionan con almacenamiento de calor sensible, pero el PCM da la posibilidad de un mayor almacenamiento de calor por unidad de masa. Es un concepto atractivo que sigue esperando dar resultados exitosos en su aplicación. Un muro lleno de PCM fue construido en la fachada sur de una vivienda al lado de una ventana. El muro se calienta durante el día por la radiación solar fundiendo el PCM. Por la noche, se retira calor para calentar la casa. Para una determinada cantidad de almacenamiento de calor, el cambio de fase requiere menos espacio que las

paredes de agua o muros Trombe convencionales siendo mucho más ligeros. Por lo tanto, parecen ser más convenientes en aplicaciones de rehabilitación de edificios. Para aplicaciones en muros Trombe se ha usado sales hidratadas e hidrocarburos a modo de PCM (Tyagi y Buddhi, 2007).

(Telkes, 1975) propuso la inclusión de los PCM en las paredes, tabiques, techos y pisos para servir como reguladores de temperatura. El PCM se ha utilizado para sustituir al elemento interior en un muro Trombe. Askew (Askew, 1978) utiliza un panel colector hecho de una placa delgada de parafina montada detrás de un doble acristalamiento en un edificio habiendo encontrado que la eficiencia térmica es comparable a la de un muro convencional.

Farouk y Guceri (Farouk y Guceri, 1981) estudiaron la utilidad del PCM instalado en el elemento interior del muro Trombe en un edificio para la calefacción nocturna utilizando una mezcla de sal de Glauber y cera SUNOCO P-116. Observó que si el PCM de la pared está diseñado adecuadamente, se eliminan algunas de las características indeseables de los muros de mampostería, con resultados comparables.

Bourdeau (Bourdeau, 1980) probó dos muros colectores pasivos utilizando cloruro de calcio hexahidratado (punto de fusión  $29^{\circ}\text{C}$ ) como un material de cambio de fase. Él llegó a la conclusión de que una pared de 8,1 cm de PCM tiene un poco de mejor rendimiento térmico que un muro de 40 cm de espesor de mampostería. Realizó pruebas experimentales y teóricas para investigar la fiabilidad del PCM para un muro Trombe ((Swet, 1980), (Ghoneim y otros, 1991), (Chandra y otros, 1985)) con sulfato de sodio decahidrato (punto de fusión  $32^{\circ}\text{C}$ ) como material de cambio de fase en la cara soleada del muro Trombe. Encontró que un muro Trombe con PCM, de menor grosor es más conveniente en comparación con un muro de mampostería ordinaria en relación con el almacenamiento de energía térmica. Knowler utilizó parafina de calidad comercial con aditivos metálicos para aumentar su conductividad y la eficiencia en el muro Trombe.

(Castellón y otros, 2007) estudiaron un muro Trombe añadido a la fachada sur para investigar si gracias al efecto del PCM, se puede utilizar durante todo el año en climas mediterráneos, con el fin de reducir tanto la demanda de calefacción como la de refrigeración. Los autores recomendaron utilizar el muro Trombe de abril a junio y de octubre a noviembre o diciembre. ((Merker y otros, 2002), (Buddhi y Sharma, 1999), (Pasupathy y otros, 2008a))



### 3.3.3.10. Fachadas ventiladas con PCM

La integración de PCM en fachadas ventiladas presenta una solución muy potente para la reducción de la climatización de edificios. En (Alvarez y otros, 2013) se muestran los resultados obtenidos para soluciones innovadoras de incorporación de PCM en comparación con otras existentes en las que se incrementan de forma considerable los coeficientes de transmisión térmica.

Álvaro Ruiz Pardo hace en su tesis doctoral un estudio de las diferentes posibilidades de fachadas ventiladas (Ruiz-Pardo, 2008). Al analizar las mismas como soluciones innovadoras de doble envolvente distingue tres tipos:

- Hoja exterior semitransparente y hoja interior opaca. A este tipo pertenecerían los Muros Parietodinámicos (cerramientos que aprovechan la energía solar para el precalentamiento del aire exterior de ventilación), los Muros Trombe (cerramientos que aprovechan la energía solar para el calentamiento por recirculación del aire interior del edificio) y los Muros Solares: iguales que el parietodinámico y el trombe pero sin recirculación de aire.
- Hoja exterior semitransparente y hoja interior semitransparente. La fachada vidriada funciona generalmente como un muro parietodinámico en invierno, mientras que en verano la circulación es de exterior a exterior con el fin de enfriar la misma.
- Hoja exterior opaca y hoja interior opaca. Fachada ventilada tradicional.

Estas fachadas funcionan mediante circulación de aire natural o forzada. En la tesis se hace un completo desarrollo de estos tipos de fachada y modelos de cálculo para las mismas.

Mediante el uso de dobles fachadas ventiladas, en Japón Xu obtuvo unos resultados de reducción de entre un 10 y un 15 % de reducción de la energía necesaria en refrigeración y de entre un 20 a 30 % en calefacción. (Xu y Ojima, 2007). Otras referencias recientes son los estudios sobre fachadas ventiladas activas para reducir la demanda de calefacción en los edificios de oficinas. (Irulegi y otros, 2012).

Álvaro de Gracia (de Gracia Cuesta, 2013) en su tesis doctoral analiza el comportamiento térmico de una fachada ventilada con material de cambio

de fase macro encapsulado en su canal de aire. Esta fachada es la del proyecto "MECLIDE" sobre la que realiza un estudio experimental de potencial de ahorro en consumos energéticos. La tesis describe una nueva correlación empírica de número de Nusselt, para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor entre el material de cambio de fase y el flujo de aire circulando por la cámara.

Otra experiencia interesante es la llevada a cabo en Vitoria-Gasteiz sobre fachadas ventiladas con PCM en su cara exterior (Diarce y otros, 2013), ellos desarrollaron un modelo que calibraron con los resultados experimentales mediante células PASLINK.

#### **3.3.3.11. Suelos con PCM**

Los forjados térmicamente activos como técnica de refrigeración natural acumulación estructural han sido estudiados por Salmerón (Salmerón, 2005).

En Korea recientemente han estudiado la integración de PCM como método de estabilización térmica en suelos radiantes que reduce la carga térmica aumentando el confort térmico. (Jeon y otros, 2013).

Otros ejemplos se han visto ya en el apartado 3.3.2.2.

### **3.3.4. Métodos de integración de PCMs**

El éxito de la integración de los PCM en la envuelta de los edificios requiere un buen medio de encapsulación para evitar fugas y garantizar la estabilidad estructural. El área y el coeficiente de transferencia de calor son también factores claves para la carga y descarga del PCM.

En los casos en los que el PCM pueda entrar directamente en contacto con las personas se debe comprobar que no se producen emisiones que deterioren la calidad del aire interior.

#### **3.3.4.1. Directa**

Consiste en añadir PCM líquido o en polvo a los materiales de construcción durante su elaboración. Es un método de integración económica. A escala de laboratorio se ha producido yeso mediante la incorporación directa

de 21-22 % de butil estearato de calidad comercial (Feldman y otros, 1991). Una operación similar se utilizó para integrar 5 % de PCM microencapsulado en hormigón. ((Cabeza y otros, 2007), (Castellón, 2008))

### 3.3.4.2. Encapsulado

El PCM encapsulado presenta interesantes ventajas para su integración en diferentes aplicaciones. Las ventajas y desventajas del encapsulado en diferentes geometrías, con diferentes materiales y su compatibilidad, fue estudiado por Lane (Lane, 1983).

Debido a la simplicidad de la geometría de una esfera (una dimensión), ha sido ampliamente considerada y analizada, por ejemplo los procesos de solidificación y fusión del agua contenida en unos elementos esféricos ha sido estudiado experimentalmente por Eames, (Eames y Adref, 2002) quien ha propuesto ecuaciones semi-empíricas que permiten predecir el porcentaje másico de fase sólida dentro de una esfera en cualquier momento durante los procesos de fusión o solidificación. Bedecarrats y otros ((Bedecarrats y Dumas, 1997), (Bédécarrats y otros, 1996)) y Alloncle, (Alloncle, 1983) estudiaron el proceso de cristalización de un PCM orgánico eutéctico encapsulado en esferas.

Algunos autores han presentado extensas revisiones de las técnicas de encapsulado para los PCMs. (Khudhair y Farid, 2004), (Zhang y otros, 2007), (Khudhair y Farid, 2004), (Sharma y Sagara, 2005)

**Microencapsulado:** El microencapsulado es un proceso donde pequeñas partículas esféricas o en forma de rodillo, son encerradas en una fina película de polímeros de alto peso molecular.

Las partículas revestidas pueden ser incorporadas en cualquier matriz compatible con la película de polímeros. Microencapsulated PCM commercialised by BASF ([www.micronal.de](http://www.micronal.de), 2013).

El microencapsulado de PCM ha sido estudiado por varios investigadores ((Brown y otros, 1998), (Hawlater y otros, 2003), (Özonur y otros, 2006)) debido a que se trata de una técnica prometedora para la integración en la edificación. Algunos productos comerciales han sido desarrolladas por empresas como BASF (([www.micronal.de](http://www.micronal.de), 2013), (Jahns, 1999), (Schossig y otros, 2003))

Gschwender estudiaron la microencapsulación de parafinas en "slurries" (Gschwender y otros, 2005) para comprobar la resistencia y desgaste que pueden sufrir en las bombas de impulsión si se usan como métodos de almacenamiento en fluidos. Experiencias prácticas de microencapsulado se han echo en el Fraunhofer ISE (Schossig y otros, 2005).

Una completa recopilación de información sobre el microencapsulado, fabricación, características y aplicaciones se recoge en la publicación de Zhao, (Zhao y Zhang, 2011).

Sin embargo, la aplicación de microencapsulados está limitada por su alto coste y la alta proporción de medio encapsulante.

**Macroencapsulado:** El macroencapsulado es la inclusión de PCM, en algún tipo de contenedor: tubos, bolsas, bolas, paneles u otros recipientes. Estos pueden servir directamente como intercambiadores de calor o pueden ser incorporados en los elementos del edificio.

Algunos productos comerciales están disponibles en el mercado. Su principal problema es la necesidad de una gran superficie para que se pueda producir el cambio de fase, aunque también por ello, son especialmente indicados para cámaras ventiladas. (www.rubitherm.de, 2013), (www.cristopia.com, 2013)). El precio es elevado.

**Inmersión:** La inmersión de PCM en elementos de fachada fue presentada como una alternativa a la adición de "pellets" rellenos con PCM. Esta técnica demostró un mayor potencial de capacidad de almacenamiento ((Salyer y Sircar, 1990) (Kedl y Stovall, 1989)). Consiste en sumergir el material poroso de construcción en PCM caliente derretido, que es absorbido por la acción capilar (Kaasinen, 1992). El proceso de inmersión para el llenado de PCM en enlucidos se ha escalado exitosamente de pequeñas piezas a hojas de tamaño completo. Otros procesos para incorporar el PCM en el enlucido han sido exitosos, como por ejemplo el empapado de PCM liquido en la pared terminada y la adición del PCM en la etapa húmeda de fabricación del yeso.

Hawes y Feldman (Hawes y Feldman, 1992), examinaron los mecanismos de absorción y establecieron las constantes de absorción de PCM en hormigón, de tal manera que se puede lograr la difusión de la cantidad deseada de

PCM. Sin embargo, como Schossig y otros, (Schossig y otros, 2005) señalaron, las fugas pueden ser un problema después de un número de años.

**Forma estabilizada:** En los últimos años, un tipo novedoso de compuesto llamado “PCM de forma estabilizada” (shape-stabilized PCM) ha atraído los intereses de los investigadores ((Inaba y Tu, 1997), (Hong y Xin-shi, 2000), (Py y otros, 2001), (Xiao y otros, 2002), (Xiao y otros, 2001)) , dado su potencial para superar los principales problemas del encapsulado, como es su elevado precio. Se compone de parafina como PCM y de HDPE (polietileno de alta densidad, high density polyethylene) o de otros compuestos como material de soporte. Dado que el porcentaje en masa de parafina puede ser hasta del 80 % aproximadamente, la energía almacenada es comparable con la de los PCM tradicionales.

Inaba y Tu ((Inaba y Tu, 1997), estudiaron el rendimiento térmico de un PCM de forma estabilizada, compuesto de parafina y HDPE. El material contenía un 74 % de parafina en peso. Ye y Ge (Hong y Xin-shi, 2000), investigaron varios tipos de polietileno de alta densidad (HDPE) con diferente índice de fusión (MI (melting index)) para su uso como material de soporte. Py y otros (Py y otros, 2001), prepararon parafina-expandible con grafito en un PCM de forma estabilizada con alta conductividad térmica. Xiao y otros ((Xiao y otros, 2002), (Xiao y otros, 2001)) , seleccionaron el copolímero de estireno-butadieno-estireno (SBS(styrene-butadiene-styrene)) como material de soporte para formar un PCM de forma estabilizada. El contenido en peso alcanzable con este material puede llegar hasta el 80 % de parafina. Zhang y otros (Zhang y otros, 2006)) realizaron un gran número de investigaciones en este campo, tanto en el desarrollo de materiales como en su aplicación ((Xu y otros, 2005) (Lin y otros, 2004) (Lin y otros, 2005)).

Estos autores desarrollaron y caracterizaron térmicamente muchos PCM de forma estabilizada, utilizando parafina y HDPE (polietileno de alta densidad) como material base. Produjeron diferentes formas por extrusión.

Existe experiencia de una gran variedad de contenedores y métodos empleados (Agyenim y otros, 2010). Figura 3.8.

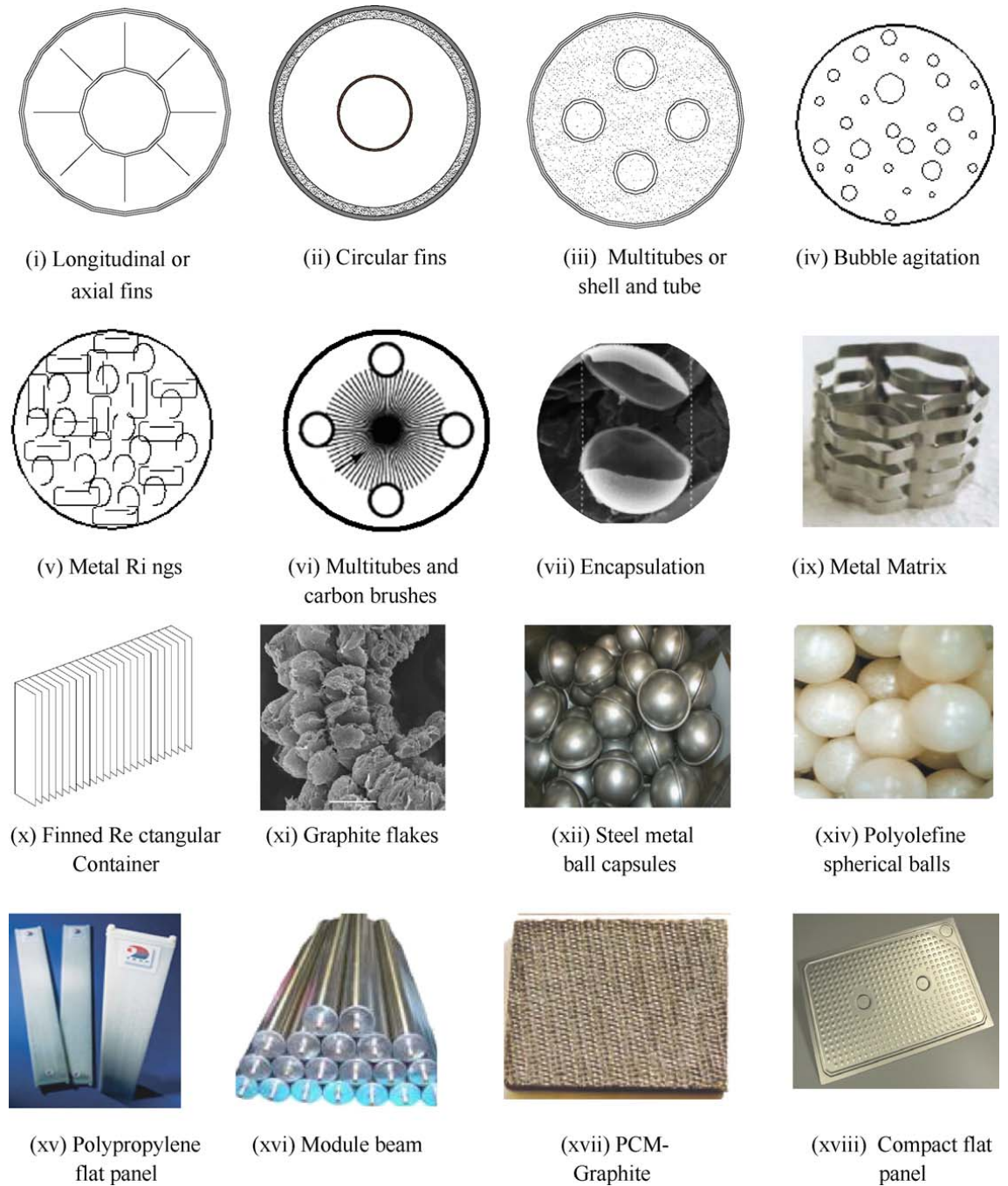


Figura 3.8: Métodos de confinamiento utilizados en investigaciones PCM. (Agyenim y otros, 2010)

## 3.4. Simulación y métodos de cálculo

El problema inherente a la simulación de sistemas de almacenamiento estructural mediante materiales de cambio de fase pasa por integrar un material con un comportamiento totalmente distinto a los demás que componen el edificio que adopta tres estados, sólido, líquido y cambio de fase. Las condiciones del transporte de calor y las condiciones de contorno son diferentes. Las soluciones analíticas requieren simplificaciones importantes y son generalmente unidimensionales pudiéndose aplicar a un número muy limitado de situaciones prácticas. Problema de Stefan.

El artificio al que se recurre para resolver el problema de la discontinuidad haciendo que las variables sean continuas en el dominio son los modelos llamados de “capacidad térmica efectiva” y de la “entalpia”. En el apartado 4.2, se describen con detalle.

Existe una gran experiencia en el modelado y simulación mediante métodos numéricos. Los modelos detallados simulan con gran precisión los fenómenos físicos en los que intervienen un gran número de variables. Existen programas comerciales para el cálculo a nivel de edificios, programas de simulación energética como EnergyPlus, TRNSYS, Therm, LIDER, CALENER, etc., software específico de dinámica de fluidos (CFD) tales como FLUENT (ANSYS), herramientas generales tales como COMSOL o ANSYS que basan su funcionamiento en el uso del método de los elementos finitos (MEF) o desarrollos específicos para resolver problemas concretos.

Es ingente la cantidad de artículos que tratan sobre distintas experiencias de simulación, siendo mayoritariamente métodos de tipo detallado. (Kuznik y otros, 2010), (Ibáñez y otros, 2005), (Crawley y otros, 2001), (Pedersen, 2007), (Tetlow y otros, 2011), (Kośny y otros, 2010), (Tabares-Velasco y otros, 2012), (Mazo y otros, 2012).

(De~Gracia y otros, 2013) hizo una revisión de los modelos numéricos desarrollados para la simulación de fachadas ventiladas. Según detalla, los modelos se pueden agrupar en analíticos, de análisis dimensional, modelos de red de flujos, enfoque por unidades de volumen, enfoque por zonas y de dinámica de fluidos (CFD).

Los modelos analíticos proporcionan información útil y no consumen muchos recursos computacionales. Son por lo general unidimensionales y se basan en correlaciones empíricas. Tienen como desventaja el tener que apoyarse

en un conjunto de hipótesis para poder resolver el problema. En estos modelos la calibración juega un papel muy importante para dar validez al modelo.

Los modelos de análisis dimensional se basan en la aplicación del teorema de Buckingham y en establecer correlaciones que dependen de números adimensionales. Estos modelos suponen constantes las propiedades termofísicas (excepto la densidad del aire). Los modelos funcionan correctamente una vez calibrados contra condiciones experimentales o contra resultados de modelos de simulación con CFDs.

Los modelos de redes de flujo de aire (Airflow network modelling) son modelos que tratan el edificio como una red en la que las partes del edificio son los nodos que se interconectan entre sí a través de los elementos por los que pasa el aire (rejillas, puertas, ventiladores, etc.). Igualmente son modelos que no consumen muchos recursos computacionales y proporcionan mucha información. Los modelos se resuelven haciendo balances energéticos.

En los modelos de enfoque por unidades de volumen la fachada se divide en distintos segmentos, generalmente de un metro de altura. En la discretización se tiene en cuenta que caudal másico de cada sección es igual al de entrada así como el resto de solicitaciones térmicas. Los distintos volúmenes se calculan e interconectan a través de este modelo.

Los modelos por zonas es un enfoque intermedio entre los primeros (agrupados) y los CFD, de modo que se reduce el cálculo al dividirse la fachada en distintos volúmenes resolviéndose el conjunto mediante un sistema de ecuaciones.

Los modelos de dinámica de fluidos consisten en resolver las ecuaciones diferenciales mediante el métodos de los elementos finitos o diferencias finitas. Los modelos CFD proporcionan información sobre lo que ocurre en la fachada con mayor precisión.

Por último, no se puede dejar de mencionar que el sub-enfriamiento no se suele tener en cuenta en los modelos habitualmente (Cabeza y otros, 2011), (Castell y otros, 2011). El sub-enfriamiento (Subcooling o supercooling) es un fenómeno que se produce por el cual el material de cambio de fase se mantiene en estado líquido por debajo de la temperatura de fusión. Durante este tiempo, al no congelarse únicamente almacena calor sensible. En el momento que se produzca una alteración de condiciones o se inicie el cambio de fase en un punto, éste se extenderá al resto rápidamente. El fenómeno de



la histéresis consiste en un ligero retardo en el fenómeno del cambio de fase, debido fundamentalmente al fenómeno del sub-enfriamiento.

En el marco del proyecto "MECLIDE" se desarrolló un método detallado (de~Gracia y otros, 2013b), (de~Gracia~Cuesta, 2013), (de~Gracia y otros, 2013c), (Ruiz-Pardo y otros, 2012), (Alvarez y otros, 2013), cuya calibración dio un resultado muy satisfactorio. Véase apartado 4.6.

### 3.5. Patentes relacionadas con PCMs aplicables a la edificación

A continuación se describen las patentes encontradas en la literatura relacionadas con la aplicación o incorporación de los PCMs en la construcción de edificios.

#### **Composición de materiales de cambio de fase. (Phase change compositions) - US Patent No. 4,797,160 (Salzer, 1989)**

Se refiere a las composiciones de materiales de cambio de fase. Específicamente a hidrocarburos alquil cristalinos de cadena larga con al menos 14 átomos de carbono. Como antecedente está la patente U.S. Pat. No. 4,259,401 (Chahroudi et al), que muestra la incorporación de PCMs, en materiales estructurales y no estructurales.

#### **Materiales de cambio de fase encapsulados para el almacenamiento de energía térmica (Encapsulated phase change thermal energy storage materials)- US Patent No. 4,513,053 (Chen y Eichelberger, 1985)**

En la patente se describen las dificultades técnicas que deben ser superadas por los PCM: aglomeración, separación de componentes, sub-enfriamiento, baja conductividad térmica, intercambiadores de calor caros, corrosión de los elementos contenedores, incompatibilidad con componentes del sistema y los límites dados por el área de transferencia. Propone el encapsulado como una forma de solucionar estos problemas.

#### **Termoplástico moldeable de PCM que no exuda Thermoplastic, (Mouldable, non-exuding phase change materials) - U.S. Patent No. 5,565,132 (Salzer, 1996)**

Esta patente dice que el problema con el cambio de fase es la contención de los materiales en una matriz. Anteriores a esta patente se describen diferentes contenedores. Cada uno de estos medios de contención tiene propiedades y utilidades para aplicaciones específicas, pero ninguno es universalmente mejor para todas las aplicaciones. Por consiguiente, la presente invención dispone de medios para contener hidrocarburos alquílicos de cambio de fase, con costos inferiores a otros sistemas además de eliminar el exudado.

**Estructura para el almacenamiento de calor o energía térmica (Heat or thermal energy storage structure) - U.S. Patent No. 4,003,426** (Best y McMillan, 1977)

En esta patente, se describe una estructura de almacenamiento de energía térmica que comprende una matriz de resina polimérica vinculada con una pluralidad de pequeñas cavidades cerradas sustancialmente desconectadas y un material disipador de calor encapsulado dentro de las cavidades.

**Productos para la edificación que incorporan cambio de fase y su metodo de incorporación (Building products incorporating phase and method of making) - U.S. Patent No. 5,755,216** (Salzer, 1998)

Esta patente describe una variedad de productos que pueden ser incorporados en las cavidades de los bloques de construcción convencionales: Cemento impregnado con PCM o en forma de "pellets" de poliolefina.

**Composición de una sustancia almacenadora de calor acuosa, que contiene dióxido de silicio pirógeno, con una prolongada y elevada eficiencia de almacenamiento térmico (Aqueous heat-storage composition containing fumed silicon dioxide and having prolonged heat-storage efficiencies) - U.S. Patent No. 4,237,023** (Johnson y Giuffrida, 1980)

Esta patente describe la composición de una sal inorgánica capaz de formar un hidrato de sal y en dicha composición acuosa. También describe un contenedor impermeable al vapor de agua y térmicamente conductor.

**Compuestos de poliolefina que contienen un material de cambio de fase dentro del enlucido de yeso y otros elementos constructivos. (Polyolefin composites containing a phase change material into gypsum wallboards and other aggregate construction panels) - U.S. Patent No. 4,988,543** (Houle y Paris, 1991)

Esta patente describe un método y un aparato para impregnar elementos porosos tales como yeso, con una cantidad precisa de PCM.

**Compuestos de poliolefina que contienen un material de cambio de fase (Polyolefin composites containing a phase change material) - U.S. Patent 5,053,446 (Salyer, 1991)**

En esta patente trata sobre los métodos para la formación de compuestos de almacenamiento de energía térmica. El compuesto está formado por una matriz de poliolefina a la que se le ha incorporado un hidrocarburo cristalino de alquil. El compuesto es de forma estable, lo que se consigue mediante la selección adecuada de las poliolefinas y / o controlando el grado de reticulación.

**Estructura de un aislamiento térmico de cambio de fase (Phase change thermal insulation structure) - U.S. Patent No. 5,770,295 (Alderman, 1998)**

Es en esta patente se describe un sistema de aislamiento útil en cubiertas y muros, que son elementos expuestos a cambios relativamente altos de temperatura y por el otro a cambios pequeños. El sistema consiste de una material de cambio de fase insertado entre dos capas de aislamiento. Describe varias formas de insertar el PCM en el centro del muro.

**Dispositivo combinado de captación solar y almacenamiento de energía térmica (Combined solar radiation collector and thermal energy storage device) - U.S. Patent No. 4,111,189 (Dizon, 1978)**

El dispositivo está compuesto por un depósito y una matriz con PCM en dicho depósito. La patente describe el proceso de fabricación de la matriz. El PCM está compuesto de polietilenglicol, pentacasone, trituaotane, camphe- ne, ácido mirístico, oxalato de metilo, ácido esteárico, y tristerin.

**Espuma que contiene un materia de absorción de energía de cambio de fase (Skived foam article containing energy absorbing phase change material) - U.S. Patent No. 5,851,338 (Pushaw, 1998)**

Esta patente describe un sustrato de espuma que está saturada con un polí- mero que contiene microesferas de un material de cambio de fase. Se describe las técnicas de aplicación.

**Recubrimiento de aislamiento térmico empleando material de cam- bio e fase microencapsulado– (Thermal insulation coating emplo- ying microencapsulated phase change material and method) - U.S. Patent No. 5,804,297 (Colvin y otros, 1998)**

Esta patente trata sobre revestimientos aislantes que ayudan a proteger la estructura de las variaciones de temperatura. El revestimiento se compone

de un material de base y de microcápsulas con PCM dispersas por todo el material. Estos materiales de cambio de fase se pueden utilizar en aeronaves, hormigón, superficies de carreteras, puentes o estructuras de edificios.

# Capítulo 4

## Modelos de cálculo

### 4.1. Desarrollo y utilización de modelos

La complejidad de la simulación de los métodos detallados unida al tiempo de cálculo requerido dan paso a resolver el problema de forma simplificada. Los modelos simplificados de caracterización o nivel 1 surgen de la necesidad de resolver de forma suficientemente aproximada la solución técnica de incorporar de forma rentable los elementos PCM en el edificio. El objetivo no es otro que elegir de un conjunto de aplicaciones posibles aquellas que, evaluadas mediante estos modelos simplificados, arrojen un mayor beneficio cuantificable en términos de ahorro de energía demandada, consumida o incluso en términos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para la cuantificación es preciso establecer indicadores agregados que permitan comparar el funcionamiento en distintas situaciones. Los programas comerciales en ocasiones presentan una aparente dificultad de la integración con otros programas y desarrollos. El desarrollo de modelos tipo 1, relativamente sencillos y muy versátiles permite la simulación rápida de procesos sin perder generalidad ni la física del fenómeno a simular. Los modelos simplificados nivel 1 calibrados permiten tomar conclusiones rápidas y pueden dar paso al desarrollo de un segundo nivel de modelos, simplificados nivel 2 caracterizados a través de los estudios de sensibilidad de variables. En la figura 4.1 se representa esta idea.

En los apartados siguientes se describirá someramente el modelo detallado desarrollado para el proyecto "MECLIDE" (citado en el apartado 1.2) y sus bases en lo necesario para abordar el desarrollo y uso de un modelo simplificado. Esta primera tarea ineludible para fabricar las herramientas de

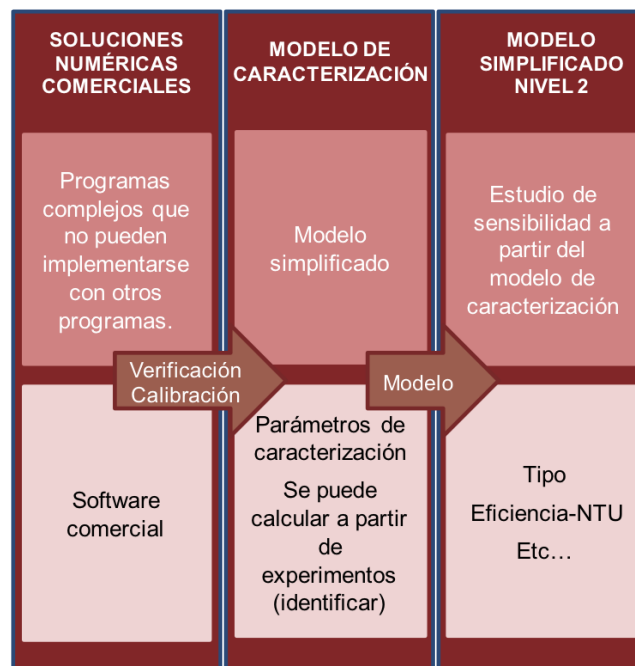


Figura 4.1: Esquema de uso de modelos (Com. personal Pr. S. Álvarez)

análisis tiene como objetivo el desarrollo teórico del modelo nivel 1, su programación y la calibración del mismo.

Las aplicaciones a las que se restringe el estudio, no por simplicidad sino por la garantía en cuanto al resultado, se centran en las fachadas ventiladas con PCM. En cuanto a los forjados formados por PCM solicitados desde su interior con aire, se hará un planteamiento teórico, cuyo desarrollo sería similar al caso de fachada aunque más simplificado. Lo anterior no quiere decir que otros sistemas (impregnados, con activación mediante agua, etc.) no puedan funcionar, sino que en estos elegidos se tiene la suficiente experiencia, también experimental, para modelar y comprobar su correcto comportamiento.

En cuanto a modelos nivel 2 no se pretende realizar un completo desarrollo sino plantear las bases desde los datos obtenidos del nivel 1.

## 4.2. Modelos detallados. Métodos numéricos

La simulación del problema cambio de fase presenta la particularidad del comportamiento diferenciado del material entre las etapas de la solidificación y la fusión. Las condiciones del transporte de calor son diferentes en cuanto a las propiedades del material así como las condiciones de contorno que presenta el problema. Este tipo de problemas llamados de Stefan son bien conocidos. Las soluciones analíticas requieren simplificaciones importantes y son generalmente unidimensionales considerando únicamente el calor por difusión.

La solución al problema de Stefan fue resuelta en relación con la solidificación del agua, véase por ejemplo (Hu y Argyropoulos, 1996). Se trata de un problema unidimensional sobre la ecuación 4.1:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

La formulación de Stefan fue desarrollada por Neumann (Neumann, 1912) considerando el proceso de la fusión.

Las soluciones analíticas del problema de Stefan se pueden aplicar a un número muy limitado de situaciones prácticas. Los métodos numéricos ofrecen la posibilidad de extender el número de problemas a resolver incluyendo modelos de más de una dimensión.

Para resolver el problema de la discontinuidad es necesario recurrir a artificios que hagan que las variables sean continuas en el dominio. Para ello se supone que la temperatura no es constante durante el cambio. De las experiencias estudiadas (Lamberg y Sirén, 2003), la solución de los problemas de cambio de fase se han abordado de mediante los modelos llamados de “capacidad térmica efectiva” y de la “entalpía”.

El método de la capacidad térmica efectiva es un artificio mediante el cual se considera que la capacidad térmica varía con la temperatura, así cuando el material llega a la temperatura de cambio de fase el calor específico aumenta de forma que el incremento de temperatura requiere la energía necesaria para el cambio de fase. Figura 4.2. Aunque en el cambio de fase esto no sea real ya que se produce a temperatura casi constante, el error cometido es pequeño.

La ecuación del calor toma la siguiente expresión en las que las variables son función de la temperatura, ecuación 4.2:

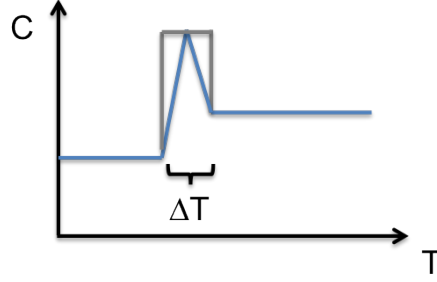


Figura 4.2: Temperatura de cambio de fase según el modelo de la capacidad térmica efectiva

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) = \rho(T) \cdot C(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (4.2)$$

El método de la entalpía consiste en un modelo que incrementa la entalpía del material según se aumenta su temperatura. El incremento de entalpía en el cambio de fase será igual al calor latente. Para que no se produzca un salto brusco se fija un rango de temperatura en las que se produce el cambio de fase de manera que sea continua. Figura 4.3.

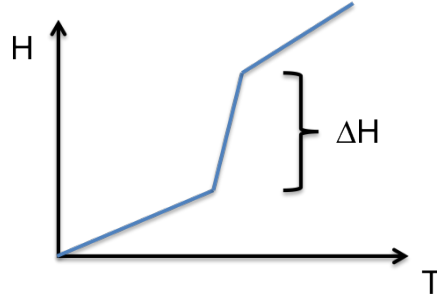


Figura 4.3: Entalpía en el cambio de fase por el método de la entalpía

La ecuación toma la siguiente expresión, ecuación 4.3:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) = \frac{\partial H(T)}{\partial t} \quad (4.3)$$

Los modelos existentes aplican estos métodos descritos habiendo desarrollos tanto de elementos finitos como de diferencias finitas. Una comparación



de éstos se puede ver en (Castell y otros, 2011).

Todos ellos deben calibrarse con ensayos experimentales para verificar su exactitud en el rango de uso y conforme al sistema que quieren modelar. Los métodos detallados presentan la característica común de la necesidad de definir suficientemente la geometría y condiciones de contorno. Además requieren de un tiempo de cálculo importante.

#### 4.2.1. Simulación de fachadas con PCM

Para la simulación de las fachadas con PCM mediante modelos detallados en el marco del proyecto "MECLIDE" se desarrolló un modelo que utiliza el método de la capacidad térmica efectiva. Es un modelo 1D + 1. Para el cálculo del PCM, el muro interior y la hoja exterior se utiliza el método de las diferencias finitas, habiéndose seleccionado el método explícito.

El esquema de la fachada que se desea simular considera un elemento de separación con el exterior, una cámara de aire por la que se puede circular aire como fluido de transporte, el elemento PCM y el muro soporte. Se opta por comprobar el comportamiento del elemento como sistema de refrigeración.

El funcionamiento del sistema como almacenamiento de calor sería similar al anterior haciendo incluso que el elemento de separación con el exterior fuese vidriado para dejar pasar los rayos solares. Este esquema de funcionamiento sería similar al de un muro Trombe o parietodinámico mejorado, al dotarse de una mayor inercia equivalente. El comportamiento de los muros Trombe fue estudiado en profundidad en la Tesis de Alvaro Ruiz-Pardo, (Ruiz-Pardo, 2008).

El funcionamiento como sistema de refrigeración aporta un valor añadido en la integración al considerar el movimiento del fluido como vehículo de transporte y ayuda a la disipación del calor de los paramentos. Figura 4.4.

El modelo divide verticalmente la cámara en secciones, en principio 3. La temperatura de la cámara aumentará en sentido vertical al circular el aire ascendentemente. Figura 4.5.

Para la resolución completa del sistema es necesario acoplar los modelos de simulación de los distintos componentes que son:

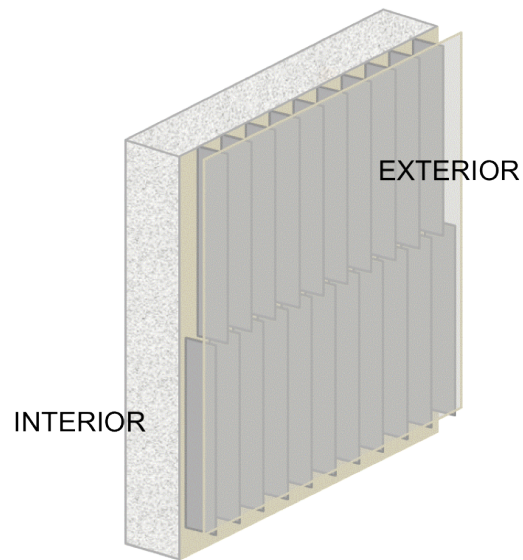
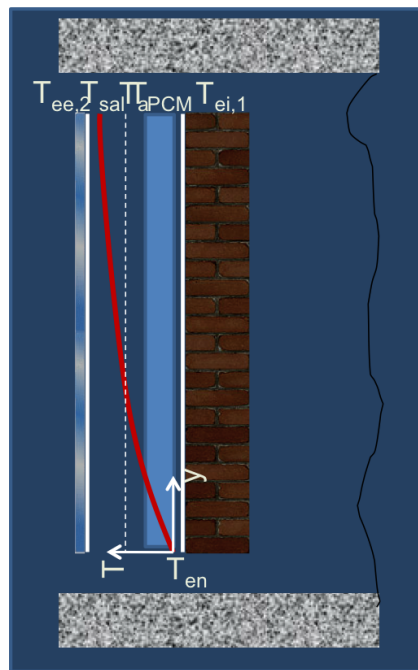


Figura 4.4: Fachada ventilada con aletas con PCM



6

Figura 4.5: Modelo de simulación fachada ventilada con aletas con PCM

- Modelo de simulación de las aletas con material de cambio de fase y los elementos interior y exterior (diferencias finitas).
- Modelo de simulación de las temperaturas del aire en la cámara.
- Modelo de simulación de intercambio de calor con el muro interior y exterior.

#### 4.2.1.1. Modelo de simulación de las aletas con material de cambio de fase y elementos interior y exterior

Como se ha dicho el método a utilizar para tener en cuenta el fenómeno de cambio de fase, es el de la capacidad térmica efectiva. Se debe especificar un rango en el que ocurre el cambio de fase, de tal manera que sea posible calcular un calor específico equivalente que simule correctamente el fenómeno de la elevada capacidad térmica que se presenta cuando el cambio de fase tiene lugar.

Las ecuaciones para las condiciones de contorno son las siguientes:

Condiciones convectivas del primer nodo, del PCM, envuelta exterior y muro:

$$T_{1,t+\Delta t} = 2Fo \left[ T_{2,t} + Bi \cdot T_{cr} + T_{1,t} \left( \frac{1}{2Fo} - Bi - 1 \right) \right] \quad (4.4)$$

Condiciones convectivas del último nodo sobre envuelta exterior y el muro interior:

$$T_{n,t+\Delta t} = T_{n,t} + 2Fo [T_{n-1,t} + Bi \cdot T_{cr} - T_{n,t} (1 + Bi)] \quad (4.5)$$

Condiciones del nodo central, condición adiabática por simetría (parte media de las aletas):

$$T_{n,t+\Delta t} = T_{n,t} + 2Fo [T_{n-1,t} - T_{n,t}] \quad (4.6)$$

Condiciones para los nodos intermedios (nodos que no limitan con el aire ni son la parte media de las aletas):

$$T_{i,t+\Delta t} = T_{i,t} + Fo (T_{i+1,t} - T_{i,t} + T_{i-1,t}) \quad (4.7)$$

#### 4.2.1.2. Modelo de simulación de las temperaturas del aire en la cámara

La temperatura de la cámara de aire se realiza por medio de un balance de energía en elementos diferenciales a lo largo de la altura de cada una de

las secciones de la fachada ventilada de tal manera que es posible calcular su evolución.

La temperatura del aire en la cámara es función de las temperaturas de las superficies, es decir de la temperatura de los elementos exterior e interior y de la temperatura superficial de las aletas rellenas de PCM, por tanto, la temperatura  $T_{max}$  está dada por la siguiente expresión:

$$T_{max} = \frac{T_{ee,2} + T_{ei,1} + 2 \cdot \Gamma_A \cdot T_L}{2 + 2 \cdot \Gamma_A} \quad (4.8)$$

Donde  $\Gamma_A$  es la relación entre el área mojada de las aletas al área de las superficies en contacto con el aire de la cámara de los elementos exterior e interior, y  $T_L$  la temperatura superficial de la aleta.

Para el cálculo de la temperatura del aire en la cámara se adopta como simplificación que la temperatura media del aire a cada altura es constante y que las aletas también presentan una temperatura uniforme.

La temperatura del aire a cada altura de la cámara  $x$  se considera con un comportamiento exponencial creciente asintótico en el valor máximo que puede alcanzar  $T_{max}$ , figura 4.6, es decir:

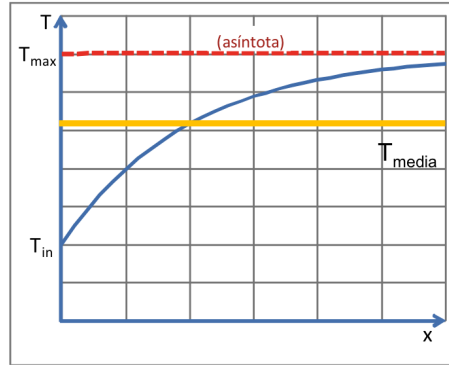


Figura 4.6: Modelo de simulación fachada. Balance energético en la cámara.

$$T_a(x) = T_{in} + \eta_a(x) \cdot (T_{max} - T_{in}) \quad (4.9)$$

siendo:

$$\eta_a(x) = 1 - \exp\left(-\frac{h_c \cdot (2 + 2 \cdot \Gamma_A)}{\rho \cdot C_p \cdot e_1 \cdot v} \cdot x\right) \quad (4.10)$$

Donde:

$e_1$  es el ancho de la cámara  
 $v$  la velocidad

Por lo que la temperatura de salida será:

$$T_{out} = T_{in} + \eta_a \cdot (T_{max} - T_{in}) \quad (4.11)$$

Siendo  $x = H$  en la ecuación 4.10.

El calor ganado por unidad de tiempo por el aire es:

$$Q_a = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (4.12)$$

Y en términos de temperatura máxima teórica:

$$Q_a = \dot{m} \cdot C_p \cdot \eta_a \cdot (T_{max} - T_{in}) \quad (4.13)$$

Esta ecuación formalmente es igual a la de la cámara sin cambio de fase.

Para la transferencia de calor por convección el comportamiento de la cámara se supone análogo al de una cámara de aire en la que no existe cambio de fase. El coeficiente convectivo de transferencia de calor en la cámara ventilada se calcula con los modelos de cámaras ventiladas desarrolladas por Balocco (Balocco, 2002) y Ruiz-Pardo (Ruiz-Pardo, 2008), con la correlación de Petukov que de acuerdo con Taylor es una de las que mejor predicen el número de Nusselt para estas configuraciones de flujo.

En resumen:

$$Nu = \frac{Re \cdot Pr \cdot f_{at}}{1,07 + 12,7 \cdot f_{at}^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.14)$$

Donde:

$$f_{at} = \frac{1,82}{8(\ln(Re) - 1,62)^2} \quad (4.15)$$

Siendo:

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} \quad (4.16)$$

Donde:

$v$  es la velocidad de aire en la cámara (m/sg)

$D_h$  es el Diámetro hidráulico  $D_h = 2e$   
 $\nu$  la viscosidad cinemática

Sin embargo el valor resultante estará por debajo del valor real ya que la correlación de Petukov indicada es para una cámara de aire diáfana, sin embargo al tener las aletas éstas crearán una perturbación en la dirección del aire, aumentando la turbulencia del flujo y aumentando por tanto el coeficiente convectivo. Para corregir este fenómeno se puede corregir el número de Nusselt medio. En el modelo simplificado se desarrolla este aspecto en el apartado 4.4.1.3.

Esto fue probado con éxito y presentado en 2012 por Ruiz Pardo (Ruiz Pardo y otros, 2012). En el mismo sentido de Gracia realizó un modelo numérico para la correlación entre los coeficientes convectivos del aire con el material de cambio de fase para este tipo de cámaras (de Gracia y otros, 2013a).

#### 4.2.1.3. Modelo de simulación del intercambio de calor por radiación entre las aletas y el muro interior y exterior

Para la transferencia de calor por radiación se tiene que estudiar el fenómeno de intercambio radiante entre las distintas superficies, fundamentalmente las aletas. Para el cálculo de las radiosidades se emplean las ecuaciones siguientes:

$$J_1 = \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4 + (1 - \epsilon_1) \cdot [F_{11} \cdot J_1 + F_{12} \cdot J_2 + F_{13} \cdot J_3] \quad (4.17)$$

$$J_2 = \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 + (1 - \epsilon_2) \cdot [F_{21} \cdot J_1 + F_{22} \cdot J_2 + F_{23} \cdot J_3] \quad (4.18)$$

$$J_3 = \epsilon_3 \cdot \sigma \cdot T_3^4 + (1 - \epsilon_3) \cdot [F_{31} \cdot J_1 + F_{32} \cdot J_2 + F_{33} \cdot J_3] \quad (4.19)$$

Para el calor las ecuaciones son las siguientes:

$$Q_{12} = 2L \cdot F_{12} \cdot (J_1 - J_2) \quad (4.20)$$

$$Q_{13} = 2L \cdot F_{13} \cdot (J_1 - J_3) \quad (4.21)$$

$$Q_{23} = 2L \cdot F_{23} \cdot (J_2 - J_3) \quad (4.22)$$

Los coeficientes de calor por radiación son:

$$h_{r,12} = \frac{Q_{12}}{2L \cdot (T_2 - T_1)} \quad (4.23)$$

$$h_{r,13} = \frac{Q_{13}}{2L \cdot (T_3 - T_1)} \quad (4.24)$$

Los factores de forma serán los siguientes para la pared exterior e interior, análogos a los que se obtendrían en el caso de que los elementos que contienen el PCM fueran perpendiculares a los muros. Figura 4.7. En general y como simplificación se considera que  $L = e$ .

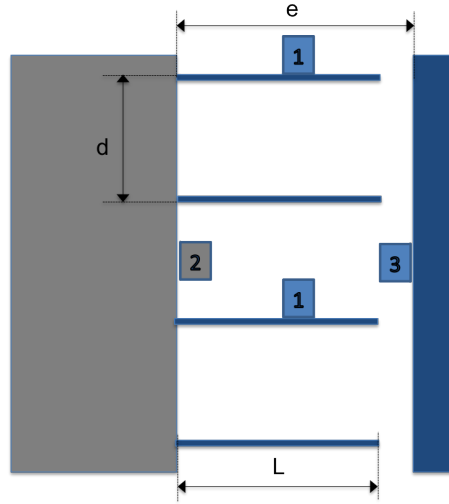


Figura 4.7: Esquema cámara de aire con aletas con PCM perpendiculares a los muros

$$F_{11} = \frac{\left[ \left( 2 \frac{L}{d} \right)^2 + 4 \right]^{1/2} - 2}{2 \cdot \frac{L}{d}} \quad (4.25)$$

$$F_{12} = \frac{d}{2 \cdot L} \cdot F_{21} \quad (4.26)$$

$$F_{21} = 1 - F_{23} \quad (4.27)$$

$$F_{23} = \frac{\left[ \left( 2 \frac{d}{L} \right)^2 + 4 \right]^{1/2} - 2}{2 \cdot \frac{d}{L}} \quad (4.28)$$

Siendo  $d$  y  $L$  las magnitudes indicadas en la figura 4.7.

Cuando las aletas forman un ángulo  $\phi$  con el muro (Figura 4.8), los factores de forma se calculan como:

$$F_{11} = \frac{\sqrt{(L \cdot \cos \phi - p)^2 + e^2} + \sqrt{(L \cdot \cos \phi + p)^2 + e^2} - 2p}{L} \quad (4.29)$$

$$F_{12} = \frac{2(L + p) - \sqrt{(L \cdot \cos \phi - p)^2 + e^2} - \sqrt{(L \cdot \cos \phi + p)^2 + e^2}}{2L} \quad (4.30)$$

$$F_{13} = F_{12} \quad (4.31)$$

$$p \cdot F_{21} = 2L \cdot F_{12} \quad (4.32)$$

$$F_{31} = F_{21} \quad (4.33)$$

$$F_{32} = F_{23} \quad (4.34)$$

Siendo  $\phi$ ,  $L$  y  $p$  las magnitudes indicadas en la figura 4.8.

#### 4.2.1.4. Acoplamiento de elementos

El acoplamiento entre los distintos elementos se realiza siguiendo el modelo del esquema eléctrico mostrado en la figura 4.9. En este caso el balance general debe incluir el acoplamiento entre la temperatura del aire y las de las superficies.

La solución se obtiene mediante la resolución del siguiente sistema de ecuaciones en las que se desconoce la temperatura superficial del muro interior  $T_{ei,1}$ , la temperatura media del aire  $\bar{T}_a$ , la de las aletas  $T_L$ , los flujos de calor que toma el aire ( $Q_a$ ), que entran y salen del muro ( $Q_{ei1,cond}$  y  $Q_{ei2,cond}$ ) y que ceden las aletas ( $Q_L$ ) y la temperatura superficial del elemento exterior  $T_{ee,1}$  y  $T_{ee,2}$ .

**Nodo 0:**

$$\frac{1}{R_e}(T_e - T_{ee,1}) + \frac{1}{R_v}(T_{ee,2} - T_{ee,1}) + Q_{ee,1} = 0 \quad (4.35)$$





**Nodo 1:**

$$\frac{1}{R_{ee}}(T_{ee,1}-T_{ee,2})+\frac{1}{R_c}(\bar{T}_a-T_{ee,2})+\frac{1}{R_{r,12}}(T_{ei,1}-T_{ee,2})+\frac{1}{R_{r,14}}(T_L-T_{ee,2})+Q_{ee,2}=0 \quad (4.36)$$

**Nodo 2:**

$$\frac{1}{R_c}(T_{ee,2}-\bar{T}_a)+\frac{1}{R_c}(T_{ei,1}-\bar{T}_a)+\frac{1}{R_c}\Gamma_A(T_L-\bar{T}_a)-Q_a=0 \quad (4.37)$$

**Nodo 3:**

$$\frac{1}{R_{r,12}}(T_{ee,2}-T_{ei,1})+\frac{1}{R_c}(\bar{T}_a-T_{ei,1})+\frac{1}{R_{r,34}}(T_L-T_{ei,1})+Q_{ei,1,cond}+Q_{ei,1}=0 \quad (4.38)$$

**Nodo 4:**

$$\frac{1}{R_{r,14}}(T_{ee,2}-T_L)+\frac{1}{R_{r,34}}(T_{ei,1}-T_L)+\frac{1}{R_c}\Gamma_A(\bar{T}_a-T_L)-Q_L=0 \quad (4.39)$$

El sistema se resuelve de forma iterativa con los distintos modelos hasta alcanzar la convergencia en cada instante de tiempo.

#### 4.2.2. Simulación de forjados con PCM

Para la simulación de los forjados con PCM mediante modelos detallados se utiliza igualmente el método de la capacidad térmica efectiva. Análogamente a como se ha hecho para fachadas se trata de un modelo 1D + 1. Para la transferencia de calor con el forjado superior e inferior se puede utilizar el método de las diferencias finitas mediante un método explícito.

El elemento PCM se incorpora en los alveolos interiores del propio forjado. El esquema del forjado a simular considera un elemento masivo (el propio forjado de hormigón) por el que circula aire en su interior como fluido de transporte.

El modo de funcionamiento en descarga puede ser con comunicación hacia el edificio o sin ésta. Análogamente al caso de fachada se trata de que exista comunicación ya que la eficiencia térmica será muy superior. Un esquema puede verse en la figura 4.10.

El elemento funcionando como estabilizador para calefacción es también posible como se ha visto en el estado del arte pero para la activación efectiva

del PCM sería preciso su combinación con energía solar mediante elementos que sean captadores de energía tales como paneles adosados.

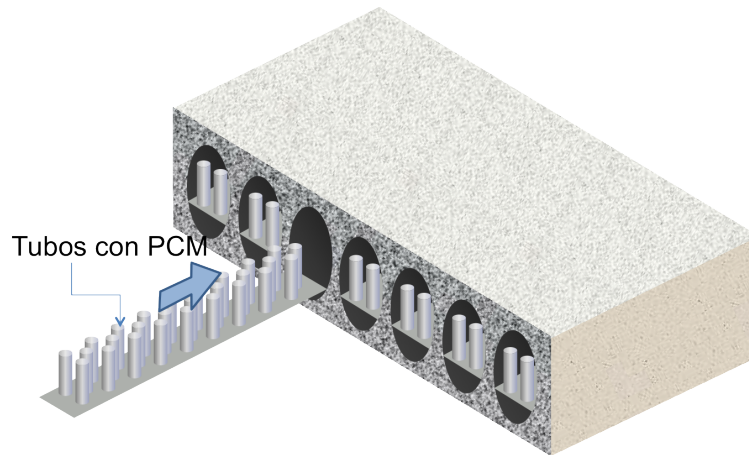


Figura 4.10: Forjado con PCM

La temperatura de la cámara aumenta en sentido del flujo de aire. Figura 4.11.

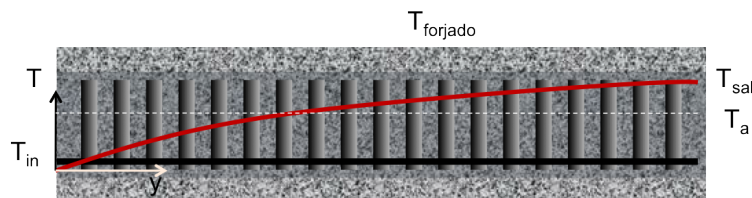


Figura 4.11: Modelo de simulación forjado ventilado con tubos rellenos de PCM

Para la resolución del sistema se deben acoplar los modelos de simulación de los componentes que son:

- Modelo de simulación de las temperaturas del aire en la cámara
- Modelo de simulación del forjado con el espacio superior e inferior y la cámara.

#### 4.2.2.1. Modelo de simulación de las temperaturas del aire en la cámara

La temperatura de la cámara de aire se realiza por medio de un balance de energía en elementos diferenciales a lo largo del conducto.

La temperatura del aire en el conducto es función de las temperaturas de las superficies que toca: el conducto de hormigón y los tubos rellenos de PCM.

En este caso.

$$\bar{T}_{max} = \frac{h_{forj} \cdot A_{forj} \cdot T_{forj} + h_{PCM} \cdot A_{PCM} \cdot T_{PCM}}{h_{forj} \cdot A_{forj} + A_{PCM} \cdot h_{PCM}} \quad (4.40)$$

Llamando  $\Gamma_A$  a la relación entre el área mojada de los tubos y el área interior del alveolo del forjado:

$$\Gamma_A = \frac{A_{PCM}}{A_{forj}} \quad (4.41)$$

Se obtiene:

$$\bar{T}_{max} = \frac{h_{forj} \cdot T_{forj} + \Gamma_A \cdot h_{PCM} \cdot T_{PCM}}{h_{forj} + \Gamma_A \cdot h_{PCM}} \quad (4.42)$$

Para el cálculo de la temperatura del aire en la cámara se adopta como simplificación que la temperatura media del aire en cada sección es constante y que los tubos también presentan una temperatura uniforme.

La temperatura del aire en cada sección  $x$  se considera con un comportamiento exponencial creciente asintótico en el valor máximo que puede alcanzar  $\bar{T}_{max}$ , figura 4.12, es decir:

$$T_a(x) = T_{in} + \eta_a(x) \cdot (\bar{T}_{max} - T_{in}) \quad (4.43)$$

siendo:

$$\eta_a(x) = 1 - \exp\left(-\frac{h_{forj} + \Gamma_A \cdot h_{PCM}}{\rho \cdot C_p \cdot \nu} \cdot P \cdot x\right) \quad (4.44)$$

Donde:

$P$  es el perímetro del alveolo  
 $\nu$  la velocidad

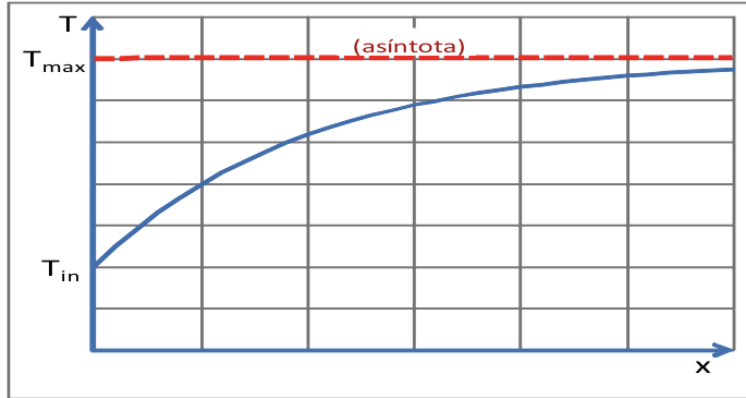


Figura 4.12: Modelo de simulación forjado. Balance energético en los alveolos.

Por lo que la temperatura de salida será:

$$T_{out} = T_{in} + \eta_a \cdot (\bar{T}_{max} - T_{in}) \quad (4.45)$$

Siendo  $x = L$  en la ecuación 4.44.

El calor ganado por unidad de tiempo por el aire es:

$$Q_a = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (4.46)$$

Y en términos de temperatura máxima teórica:

$$Q_a = \dot{m} \cdot C_p \cdot \eta_a \cdot (\bar{T}_{max} - T_{in}) \quad (4.47)$$

Esta ecuación formalmente sería igual a la de un forjado sin PCM en su interior.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor en los alveolos de los forjados se calcula mediante la correlación de flujo exterior a conductos con flujo cruzado, con lo que se consiguen altos coeficientes de película para bajas velocidades. Se utiliza para ello la correlación de Grimison, (Grimison, 1937) para un flujo de aire a través de haces de tubos compuestos de diez o más líneas ( $N_L \geq 10$ )

$$Nu_D = 1,13 \cdot C_1 \cdot Re_{D,max}^m \cdot Pr^{1/3} \quad (4.48)$$

Donde:

$$2000 < Re_{D,max}^m < 4000 \quad (4.49)$$

Siendo:

$$Pr \geq 0,7 \quad (4.50)$$

Los coeficientes  $C_1$  y  $m$  dependen de si el haz de tubos está en línea o al tresbolillo y de la separación entre centros de los mismos.

#### 4.2.2.2. Modelo de simulación del forjado con el espacio superior e inferior y la cámara

Para la transferencia de calor se utiliza el método de los factores de respuesta. Considerando el forjado con tres caras, superior, inferior e interna. Figura 4.13

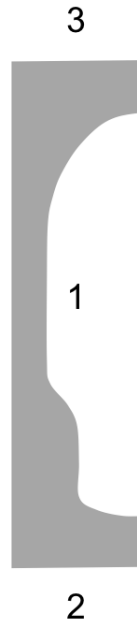


Figura 4.13: Esquema de simulación de forjado a tres caras

Las ecuaciones son las siguientes:

$$R_{C1} = \sum_{i=0}^{n1} b_{11,i} E_{1,i} + \sum_{i=0}^{n2} b_{12,i} E_{2,i} + \sum_{i=0}^{n3} b_{13,i} E_{3,i} + d \cdot R(-1) \quad (4.51)$$

$$R_{C2} = \sum_{i=0}^{n1} b_{21,i} E_{1,i} + \sum_{i=0}^{n2} b_{22,i} E_{2,i} + \sum_{i=0}^{n3} b_{23,i} E_{3,i} + d \cdot R(-1) \quad (4.52)$$

$$R_{C3} = \sum_{i=0}^{n1} b_{31,i} E_{1,i} + \sum_{i=0}^{n2} b_{32,i} E_{2,i} + \sum_{i=0}^{n3} b_{33,i} E_{3,i} + d \cdot R(-1) \quad (4.53)$$

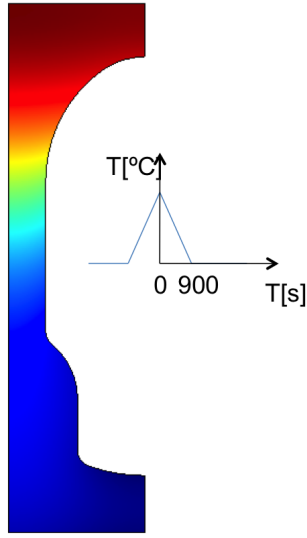


Figura 4.14: Esquema de simulación de forjado a tres caras ante solicitación

El sistema se resuelve de forma iterativa con los distintos modelos hasta alcanzar la convergencia en cada instante de tiempo.

### 4.3. Modelos simplificados nivel 1

Los modelos simplificados de nivel 1 son modelos en los que manteniendo la misma física de los modelos detallados se realizan simplificaciones en aras a agilizar el cálculo.

Se trata de efectuar un modelo eléctrico simplificado que sea equivalente al inicial. Para tener en cuenta los fenómenos de inercia térmica se establece un modelo de capacidad equivalente. Aún a expensas de perder algo de

precisión se realizan simplificaciones para despreciar los fenómenos de menor importancia tales como los siguientes:

- Transferencia de calor por radiación entre superficies distantes (elemento exterior e interior)
- Transferencia de calor por radiación entre aletas debido a tener una temperatura similar

Dado que lo que se plantea como objetivo es disponer de un modelo lo suficientemente preciso no se harán simplificaciones que puedan alterar el valor del resultado.

#### 4.3.1. Modelo simplificado nivel 1. Fachada con PCM

Para el desarrollo del modelo simplificado nivel 1 de fachada se parte del esquema equivalente incluido en la Figura 4.9. El esquema propuesto en el simplificado nivel 1 trata de modelar con detalle el comportamiento del elemento interior y exterior para tener en cuenta la inercia térmica de estos. El esquema eléctrico equivalente simplificado se muestra en la figura 4.15.

En este esquema se representa tanto el muro interior como el elemento exterior de la fachada con tres resistencias y dos condensadores. De esta forma es posible modelar casi cualquier combinación de elementos constructivos. El modelo tiene en cuenta la radiación de las superficies interiores de la cámara con los elementos que contienen el PCM. Se desprecia la transferencia de calor por radiación entre las superficies interiores de la cámara al considerarse distantes y albergar las aletas de PCM entre ellas. Igualmente se desprecia la transferencia de calor por radiación entre las aletas que contienen el PCM. El modelo tiene en cuenta la transferencia de calor por convección de todas las superficies con el aire que circula por la cámara.

La radiación solar se tiene en cuenta a través de la incidencia y absorptividad del elemento exterior. El modelo no contempla el caso de que la fachada exterior sea acristalada, aunque su extensión a este caso se haría con la misma metodología salvo la complicación añadida de definir las distintas excitaciones posibles en las capas interiores. Para que el modelo fuera más real sería conveniente definir factores solares y de sombra, lo que no se aborda. Además la radiación difícilmente podría incidir en las capas interiores al existir los elementos PCM en la cámara. En el caso de elementos exteriores acristalados



el sistema perdería ventajas en la refrigeración por incrementarse las pérdidas.

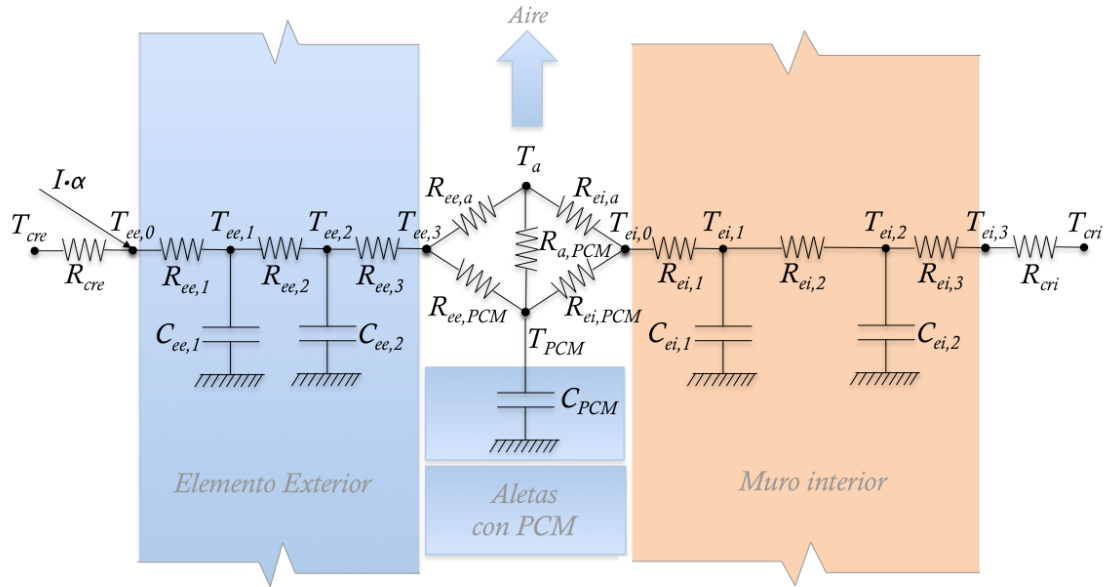


Figura 4.15: Esquema eléctrico equivalente de fachada. Nivel1

Definición de las variables del modelo:

Elemento exterior:

- $T_{cre}$ : Temperatura convectivo radiante del aire exterior
- $R_{cre}$ : Resistencia convectivo radiante exterior
- $I$ : Incidencia
- $\alpha$ : Absortividad
- $T_{ee,0}$ : Temperatura superficial exterior del elemento exterior
- $R_{ee,1}$ : Resistencia térmica entre la temperatura superficial exterior del elemento exterior y el interior del elemento susceptible de excitación diaria

- $T_{ee,1}$ : Temperatura interior del elemento exterior próxima a su superficie exterior
- $C_{ee,1}$ : Capacidad del elemento exterior relativa a la masa superficial más externa
- $R_{ee,2}$ : Resistencia térmica interior del elemento exterior
- $T_{ee,2}$ : Temperatura interior del elemento exterior próxima a su superficie interior
- $C_{ee,2}$ : Capacidad del elemento exterior relativa a la masa superficial más interna
- $R_{ee,3}$ : Resistencia térmica entre la temperatura superficial interior abierta a la cámara del elemento exterior y el interior del elemento, susceptible de excitación diaria

Cámara:

- $T_{ee,3}$ : Temperatura superficial interior a la cámara del elemento exterior
- $R_{ee,a}$ : Resistencia convectiva entre la superficie interior abierta a la cámara del elemento exterior y el aire que circula por ésta.
- $T_a$ : Temperatura del aire en el interior de la cámara
- $R_{ee,PCM}$ : Resistencia radiante entre la superficie interior abierta a la cámara del elemento exterior y los elementos que contienen el PCM
- $R_{a,PCM}$ : Resistencia convectiva entre la superficie de los elementos que contienen el PCM y el aire que circula por la cámara
- $T_{PCM}$ : Temperatura superficial de los elementos que contienen el PCM
- $C_{PCM}$ : Capacidad de los elementos que contienen el PCM
- $R_{ei,PCM}$ : Resistencia radiante entre la superficie interior abierta a la cámara del muro interior y los elementos que contienen el PCM
- $R_{ei,a}$ : Resistencia convectiva entre la superficie interior abierta a la cámara del muro interior y el aire que circula por ésta
- $T_{ei,0}$ : Temperatura superficial interior a la cámara del muro interior

Muro interior:

- $R_{ei,1}$ : Resistencia térmica entre la temperatura superficial interior abierta a la cámara del muro interior y el interior del muro, susceptible de excitación
- $T_{ei,1}$ : Temperatura interior del muro interior próxima a su superficie exterior
- $C_{ei,1}$ : Capacidad del muro interior relativa a la masa superficial más externa
- $R_{ei,2}$ : Resistencia térmica interior del muro interior
- $T_{ei,2}$ : Temperatura interior del muro interior próxima a su superficie interior
- $C_{ei,2}$ : Capacidad del muro interior relativa a la masa superficial más interna
- $R_{ei,3}$ : Resistencia térmica entre la temperatura superficial interior del muro interior y el interior del edificio
- $T_{ei,3}$ : Temperatura superficial interior del muro interior
- $R_{cre}$ : Resistencia convectivo radiante interior del muro interior
- $T_{cri}$ : Temperatura convectivo radiante interior del edificio

Definición de las resistencias en la cámara:

$R_{ee,a}$ : Resistencia convectiva entre la superficie interior abierta a la cámara del elemento exterior y el aire que circula por ésta:

$$R_{ee,a} = \frac{1}{A_{ee} \cdot hc_{ee,a}} \quad (4.54)$$

Siendo  $A_{ee}$  el área exterior de la cámara y  $hc_{ee,a}$  el coeficiente convectivo de esta superficie.

$R_{ee,PCM}$ : Resistencia radiante entre la superficie interior abierta a la cámara del elemento exterior y los elementos que contienen el PCM:

$$R_{ee,PCM} = \frac{1}{A_{PCM} \cdot hr_{ee,PCM}} \quad (4.55)$$

Siendo  $A_{PCM}$  el área expuesta de los elementos que contienen el PCM y  $hr_{ee,PCM}$  el coeficiente radiante de esta superficie exterior y los elementos

que contienen el PCM, afectado por el factor de forma.

$R_{a,PCM}$ : Resistencia convectiva entre la superficie de los elementos que contienen el PCM y el aire que circula por la cámara:

$$R_{a,PCM} = \frac{1}{A_{PCM} \cdot hc_{PCM}} \quad (4.56)$$

Siendo  $A_{PCM}$  el área expuesta de los elementos que contienen el PCM y  $hc_{PCM}$  el coeficiente convectivo de los elementos que contienen el PCM.

$R_{ei,PCM}$ : Resistencia radiante entre la superficie interior abierta a la cámara del muro interior y los elementos que contienen el PCM:

$$R_{ei,PCM} = \frac{1}{A_{PCM} \cdot hr_{ei,PCM}} \quad (4.57)$$

Siendo  $A_{PCM}$  el área expuesta de los elementos que contienen el PCM y  $hr_{ei,PCM}$  el coeficiente radiante de esta superficie interior de la cámara y los elementos que contienen el PCM, afectado por el factor de forma.

$R_{ei,a}$ : Resistencia convectiva entre la superficie interior abierta a la cámara del muro interior y el aire que circula por ésta:

$$R_{ei,a} = \frac{1}{A_{ei} \cdot hc_{ei,a}} \quad (4.58)$$

Siendo  $A_{ei}$  el área exterior de la cámara y  $hc_{ei,a}$  el coeficiente convectivo de esta superficie.

#### 4.3.1.1. Resolución de las capacidades del modelo

Cada conjunto de resistencias y capacidades se puede reagrupar en un esquema equivalente formado por una resistencia y un condensador tal y como se representa en la figura 4.16.

Haciendo un balance de energía sobre el elemento "i", obtenemos:

$$\frac{1}{R_{eq,i}} \cdot (T_{eq,i} - T_{e,i}) = C_{e,i} \cdot \frac{dT_{e,i}}{dt} \quad (4.59)$$

La solución a esta ecuación será:

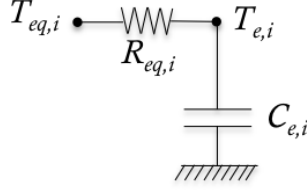


Figura 4.16: Esquema simplificado base

$$T_{e,i}(t) = T_{eq,i} + [T_{e,i}(0) - T_{eq,i}] \cdot \exp\left(\frac{-t}{C_{e,i} \cdot R_{eq,i}}\right) \quad (4.60)$$

Si expresamos la ecuación para un paso de tiempo dado obtenemos:

$$T_{e,i}(t) = T_{eq,i} + [T_{e,i}(t - \Delta t) - T_{eq,i}] \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_{e,i} \cdot R_{eq,i}}\right) \quad (4.61)$$

Por tanto el cálculo de las capacidades del modelo para cada instante de tiempo es exacto pudiéndose calcular a través de las siguientes expresiones en función de las temperaturas equivalentes:

$$T_{e,i}(t) = T_{eq,i} + [T_{e,i}(t - \Delta t) - T_{eq,i}] \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_{e,i} \cdot R_{eq,i}}\right) \quad (4.62)$$

Las capacidades del modelo se resuelven según las siguientes expresiones:

$$T_{ee,1}(t) = T_{eq,ee,1} + [T_{ee,1}(t - \Delta t) - T_{eq,ee,1}] \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_{ee,1} \cdot R_{eq,ee,1}}\right) \quad (4.63)$$

$$T_{ee,2}(t) = T_{eq,ee,2} + [T_{ee,2}(t - \Delta t) - T_{eq,ee,2}] \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_{ee,2} \cdot R_{eq,ee,2}}\right) \quad (4.64)$$

$$T_{PCM}(t) = T_{eq,PCM} + [T_{PCM}(t - \Delta t) - T_{eq,PCM}] \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_{PCM} \cdot R_{eq,PCM}}\right) \quad (4.65)$$

$$T_{ei,1}(t) = T_{eq,ei,1} + [T_{ei,1}(t - \Delta t) - T_{eq,ei,1}] \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_{ei,1} \cdot R_{eq,ei,1}}\right) \quad (4.66)$$

$$T_{ei,2}(t) = T_{eq,ei,2} + [T_{ei,2}(t - \Delta t) - T_{eq,ei,2}] \cdot \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_{ei,2} \cdot R_{eq,ei,2}}\right) \quad (4.67)$$

El tiempo característico de cada condensador se puede evaluar como  $C_{e,i} \cdot R_{eq,i}$ , el intervalo máximo de cálculo vendrá dado por el mínimo de estos valores. Se establece un máximo de 300 segundos con el fin de no perder precisión para valores muy altos.

#### 4.3.1.2. Resolución de las temperaturas del modelo

Para el cálculo de las temperaturas del modelo se agrupan las resistencias térmicas y se establecen los nodos con temperatura equivalente que a su vez se calculan.

Comenzando por el elemento exterior tal y como se representa en la figura 4.17.

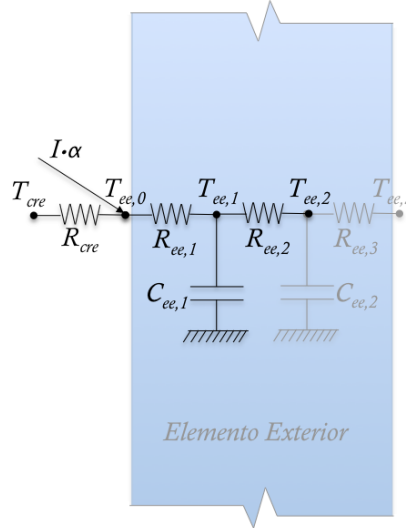


Figura 4.17: Esquema simplificado del elemento exterior

$$R_{cre} = \frac{1}{A_{ee} \cdot (hc_e + hr_e)} \quad (4.68)$$

Siendo  $A_{ee}$  el área exterior de la fachada y  $hc_e$  y  $hr_e$  los coeficientes convectivo y radiante de esta superficie.

La temperatura convectivo radiante exterior  $T_{cre}$  es:

$$T_{cre} = \frac{hc_e \cdot T_{ce} + hr_e \cdot T_{re}}{hc_e + hr_e} \quad (4.69)$$

Realizando un balance de flujos energéticos en el nodo 0, se obtiene:

$$I \cdot \alpha + (hc_e + hr_e) \cdot (T_{cre} - T_{ee,0}) + \frac{1}{R_{ee,1} \cdot A_{ee}} \cdot (T_{ee,1} - T_{ee,0}) = 0 \quad (4.70)$$

Despejando en la anterior ecuación se obtiene  $T_{ee,0}$ .

$$T_{ee,0} = \frac{I \cdot \alpha + (hc_e + hr_e) \cdot T_{cre} + \frac{T_{ee,1}}{R_{ee,1} \cdot A_{ee}}}{(hc_e + hr_e) + \frac{1}{R_{ee,1} \cdot A_{ee}}} \quad (4.71)$$

$T_{ee,1}$  se calcula según la ecuación 4.63. Para su resolución en cada instante de tiempo se tiene que agrupar las resistencias  $R_{ee,1}$  y  $R_{ee,2}$

$$R_{eq,ee,1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ee,1}} + \frac{1}{R_{ee,2}}} \quad (4.72)$$

La temperatura equivalente queda:

$$T_{eq,ee,1} = \frac{\frac{T_{ee,0}}{R_{ee,1}} + \frac{T_{ee,2}}{R_{ee,2}}}{\frac{1}{R_{ee,1}} + \frac{1}{R_{ee,2}}} \quad (4.73)$$

$T_{ee,2}$  se calcula según la ecuación 4.64. Para su resolución en cada instante de tiempo se tiene que agrupar las resistencias  $R_{ee,2}$ ,  $R_{ee,3}$ ,  $R_{ee,a}$  y  $R_{ee,PCM}$  representadas en la figura 4.18.

$$R_{a-PCM,ee} = \frac{1}{A_{ee} \cdot (hc_{ee,a} + hr_{ee,PCM})} \quad (4.74)$$

La temperatura del nodo 3 agrupado será

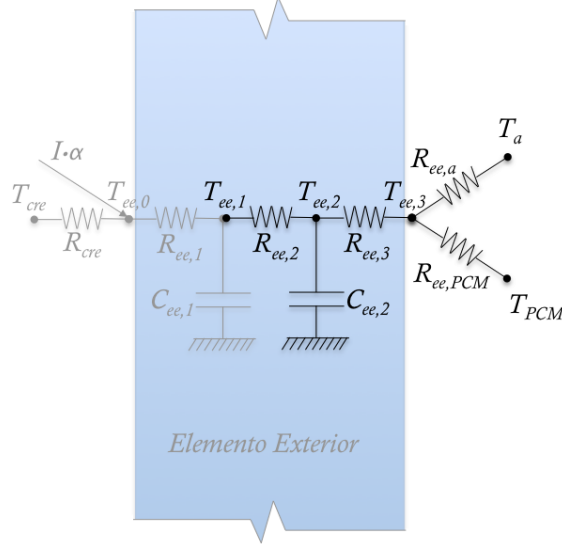


Figura 4.18: Esquema simplificado del elemento exterior y la cámara

$$T_{a,PCM,ee} = \frac{T_a \cdot hc_{ee,a} + T_{PCM} \cdot hr_{ee,PCM}}{hc_{ee,a} + hr_{ee,PCM}} \quad (4.75)$$

Reagrupando con  $R_{ee,3}$  en serie se obtiene:

$$R_{ee,a,PCM} = R_{ee,3} + R_{a-PCM,ee} \quad (4.76)$$

Quedando finalmente:

$$R_{eq,ee,2} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ee,2}} + \frac{1}{R_{ee,a,PCM}}} \quad (4.77)$$

La temperatura equivalente queda:

$$T_{eq,ee,2} = \frac{\frac{T_{ee,1}}{R_{ee,2}} + \frac{T_{a,PCM,ee}}{R_{ee,a,PCM}}}{\frac{1}{R_{ee,2}} + \frac{1}{R_{ee,a,PCM}}} \quad (4.78)$$

La temperatura  $T_{ee,3}$  se obtiene como:

$$T_{ee,3} = \frac{hc_{ee,a} \cdot T_a + hr_{ee,PCM} \cdot T_{PCM} + \frac{T_{ee,2}}{R_{ee,3} \cdot A_{ee}}}{hc_{ee,a} + hr_{ee,PCM} + \frac{1}{R_{ee,3} \cdot A_{ee}}} \quad (4.79)$$



$T_{PCM}$  se calcula según la ecuación 4.65. Para su resolución en cada instante de tiempo se tiene que agrupar las resistencias  $R_{ee,PCM}$ ,  $R_{a,PCM}$  y  $R_{ei,PCM}$  representadas en la figura 4.19.

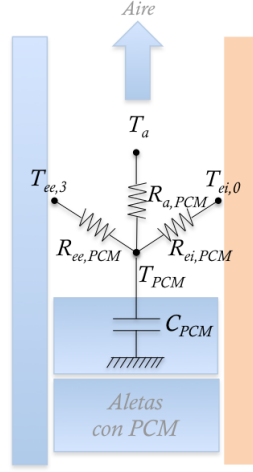


Figura 4.19: Esquema simplificado de la cámara

$$R_{eq,PCM} = \frac{1}{A_{PCM} \cdot (hr_{PCM,ee} + hc_{PCM} + hr_{PCM,ei})} \quad (4.80)$$

La temperatura equivalente queda:

$$T_{eq,PCM} = \frac{hr_{PCM,ee} \cdot T_{ee,3} + hc_{PCM} \cdot T_a + hr_{PCM,ei} \cdot T_{ei,0}}{hr_{PCM,ee} + hc_{PCM} + hr_{PCM,ei}} \quad (4.81)$$

Análogamente para calcular la interacción del muro interior con la cámara se que agrupar las resistencias representadas en la figura 4.20.

La temperatura  $T_{ei,0}$  se obtiene como:

$$T_{ei,0} = \frac{hc_{ei,a} \cdot T_a + hr_{ei,PCM} \cdot T_{PCM} + \frac{T_{ei,1}}{R_{ei,1} \cdot A_{ee}}}{hc_{ei,a} + hr_{ei,PCM} + \frac{1}{R_{ei,1} \cdot A_{ee}}} \quad (4.82)$$

$T_{ei,1}$  se calcula según la ecuación 4.66. Para su resolución en cada instante de tiempo se tiene que agrupar las resistencias  $R_{ei,2}$ ,  $R_{ei,1}$ ,  $R_{ei,a}$  y  $R_{ei,PCM}$ .

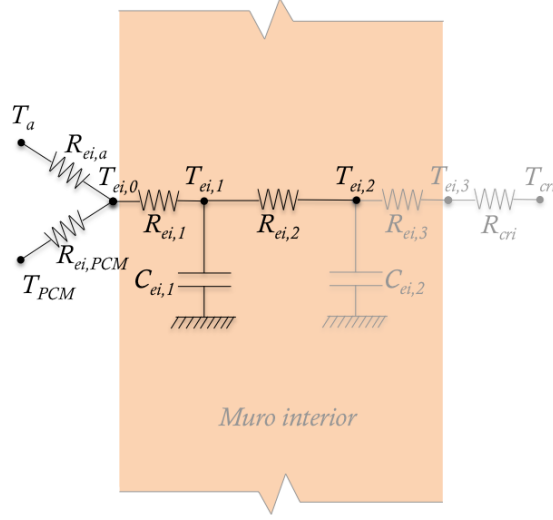


Figura 4.20: Esquema simplificado del muro interior y la cámara

$$R_{a-PCM,ei} = \frac{1}{A_{ee} \cdot (hc_{ei,a} + hr_{ei,PCM})} \quad (4.83)$$

La temperatura del nodo 1 interior agrupado será

$$T_{a,PCM,ei} = \frac{T_a \cdot hc_{ei,a} + T_{PCM} \cdot hr_{ei,PCM}}{hc_{ei,a} + hr_{ei,PCM}} \quad (4.84)$$

Reagrupando con  $R_{ei,1}$  en serie se obtiene:

$$R_{ei,a,PCM} = R_{ei,1} + R_{a-PCM,ei} \quad (4.85)$$

Quedando finalmente:

$$R_{eq,ei,1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ei,2}} + \frac{1}{R_{ei,a,PCM}}} \quad (4.86)$$

La temperatura equivalente queda:

$$T_{eq,ei,1} = \frac{\frac{T_{ei,2}}{R_{ei,2}} + \frac{T_{a,PCM,ei}}{R_{ei,a,PCM}}}{\frac{1}{R_{ei,2}} + \frac{1}{R_{ei,a,PCM}}} \quad (4.87)$$

$T_{ei,2}$  se calcula según la ecuación 4.67. Para su resolución en cada instante de tiempo se tiene que agrupar las resistencias  $R_{ei,2}$ ,  $R_{ei,3}$  y  $R_{cri}$  representadas en la figura 4.21.

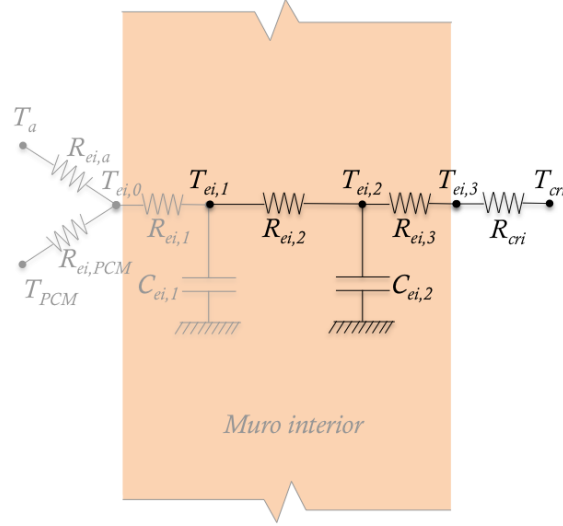


Figura 4.21: Esquema simplificado del muro interior

$$R_{eq,ei,2} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ei,2}} + \frac{1}{R_{ei,3} + R_{cri}}} \quad (4.88)$$

O lo que es lo mismo:

$$R_{eq,ei,2} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ei,2}} + \frac{1}{R_{ei,3} + \frac{1}{A_{ei}(hc_i + hr_i)}}} \quad (4.89)$$

La temperatura equivalente queda:

$$T_{eq,ei,2} = \frac{\frac{T_{ei,1}}{R_{ei,2}} + \frac{T_{cri}}{R_{ei,3} + \frac{1}{A_{ei}(hc_i + hr_i)}}}{\frac{1}{R_{ei,2}} + \frac{1}{R_{ei,3} + \frac{1}{A_{ei}(hc_i + hr_i)}}} \quad (4.90)$$

Resuelto lo anterior también se puede determinar  $T_{ei,3}$  haciendo un balance de flujos en el nodo 3:

$$(hc_i + hr_i) \cdot (T_{cri} - T_{ei,3}) + \frac{1}{R_{ei,3} \cdot A_{ee}} \cdot (T_{ei,2} - T_{ei,3}) = 0 \quad (4.91)$$

$$T_{ei,3} = \frac{(hc_i + hr_i) \cdot T_{cri} + \frac{T_{ei,2}}{R_{ei,3} \cdot A_{ee}}}{(hc_i + hr_i) + \frac{1}{R_{ei,3} \cdot A_{ee}}} \quad (4.92)$$

El modelo propuesto ha tratado de evaluar fielmente el comportamiento en términos de flujo, sin embargo la temperatura  $T_{ei,3}$ , por la propia configuración del modelo, presentará una dispersión debida al efecto de la proximidad con el condensador. Este factor no afecta a la calidad del modelo, pero por ello esta temperatura no se calculará.

Por último la resistencia térmica convectivo radiante interior es:

$$R_{cri} = \frac{1}{A_{ei} \cdot (hc_i + hr_i)} \quad (4.93)$$

La temperatura convectivo radiante interior  $T_{cri}$  es:

$$T_{cri} = \frac{hc_i \cdot T_{ci} + hr_i \cdot T_{ri}}{hc_i + hr_i} \quad (4.94)$$

#### 4.3.1.3. Cálculo de la temperatura del aire en la cámara

El comportamiento térmico del aire en la cámara será exponencial creciente y asintótico, creciendo entre el valor de entrada y un máximo, tal y como se describió en el modelo detallado. El cálculo de la temperatura el aire se obtiene mediante un balance de energía en cada sección. Para el modelo simplificado nivel 1 se adoptan las siguientes simplificaciones:

- La temperatura de cada sección es constante
- Las aletas presentan una temperatura uniforme
- La temperatura del aire en cada sección es la media entre la de entrada y la de salida

Con estas simplificaciones, haciendo un balance energético en la cámara se obtiene:

$$Q_{aire} = A_{ei} \cdot hc_{ei} \cdot (T_{ei,0} - T_{aire}) + A_{ee} \cdot hc_{ee} \cdot (T_{ee,0} - T_{aire}) + A_{PCM} \cdot hc_{PCM} \cdot (T_{PCM} - T_{aire}) \quad (4.95)$$

Por otra parte:

$$Q_{aire} = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (4.96)$$

Como se ha supuesto por simplificación que:

$$T_{aire} = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (4.97)$$

Igualando y despejando  $T_{aire}$  se obtiene:

$$T_{aire} = \frac{2 \cdot \dot{m} \cdot Cp \cdot T_{in} + A_{ee} \cdot hc_{ee} \cdot T_{ee,3} + A_{ei} \cdot hc_{ei} \cdot T_{ei,0} + A_{PCM} \cdot hc_{PCM} \cdot T_{PCM}}{2 \cdot \dot{m} \cdot Cp + A_{ee} \cdot hc_{ee} + A_{ei} \cdot hc_{ei} + A_{PCM} \cdot hc_{PCM}} \quad (4.98)$$

$$T_{out} = 2 \cdot T_{aire} - T_{in} \quad (4.99)$$

La ecuación 4.98 no tiene en cuenta que la temperatura tiene un máximo asintótico limitante. El máximo se produce cuando no existe transferencia térmica es decir cuando  $Q_{aire}$  se anula. El valor máximo de la temperatura del aire por tanto vendrá dado por:

$$T_{max} = \frac{A_{ee} \cdot hc_{ee} \cdot T_{ee,3} + A_{ei} \cdot hc_{ei} \cdot T_{ei,0} + A_{PCM} \cdot hc_{PCM} \cdot T_{PCM}}{A_{ee} \cdot hc_{ee} + A_{ei} \cdot hc_{ei} + A_{PCM} \cdot hc_{PCM}} \quad (4.100)$$

La diferencia de temperatura del aire con la temperatura de entrada no podrá superar este límite.

### 4.3.2. Modelo simplificado nivel 1. Forjado con PCM

#### 4.3.2.1. Planteamiento del modelo

Para el desarrollo del modelo simplificado nivel 1 del forjado se parte del esquema equivalente incluido en la Figura 4.22.

Se parte de las siguientes variables representadas en la figura 4.23:

- $T_{sup}$ : Temperatura de la parte superior del forjado, en contacto con el suelo del recinto superior
- $R_{sup}$ : Resistencia térmica entre el interior del forjado y la temperatura de la parte superior de éste
- $C_{es}$ : Capacidad de la parte superior del forjado

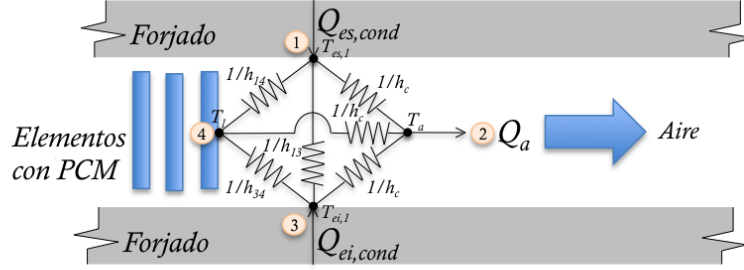


Figura 4.22: Esquema eléctrico para la simulación de forjado ventilado con PCM

- $T_{es}$ : Temperatura del interior de la parte superior del forjado
- $R_{es\_s}$ : Resistencia térmica entre la temperatura superficial del alveolo y la temperatura del interior del forjado, en la parte superior
- $T_{s,es,a}$ : Temperatura superficial de la parte superior del alveolo cuya superficie está en contacto con el aire que circula por su interior
- $T_{inf}$ : Temperatura de la parte inferior del forjado en contacto con el techo del recinto inferior
- $R_{inf}$ : Resistencia térmica entre el interior del forjado y la temperatura de la parte inferior de éste
- $C_{ei}$ : Capacidad de la parte inferior del forjado
- $T_{ei}$ : Temperatura del interior de la parte inferior del forjado
- $R_{ei\_s}$ : Resistencia térmica entre la temperatura superficial del alveolo y la temperatura del interior del forjado, en la parte inferior
- $T_{s,ei,a}$ : Temperatura superficial de la parte inferior del alveolo cuya superficie está en contacto con el aire que circula por su interior
- $A_s$ : área de la parte superior del alveolo
- $A_i$ : área de la parte inferior del alveolo
- $h_c$ : coeficiente convectivo en el interior del alveolo

- $T_{aire}$ : Temperatura del aire de la cámara
- $A_{PCM}$ : área de los elementos que contienen el PCM
- $T_{s,PCM,a}$ : Temperatura superficial de los elementos con PCM en contacto con el aire de la cámara
- $R_{PCM_s}$ : Resistencia térmica entre la temperatura superficial del PCM y la temperatura del PCM.
- $T_{PCM}$ : Temperatura de los elementos contenedores de PCM
- $C_{PCM}$ : Capacidad de los elementos contenedores de PCM

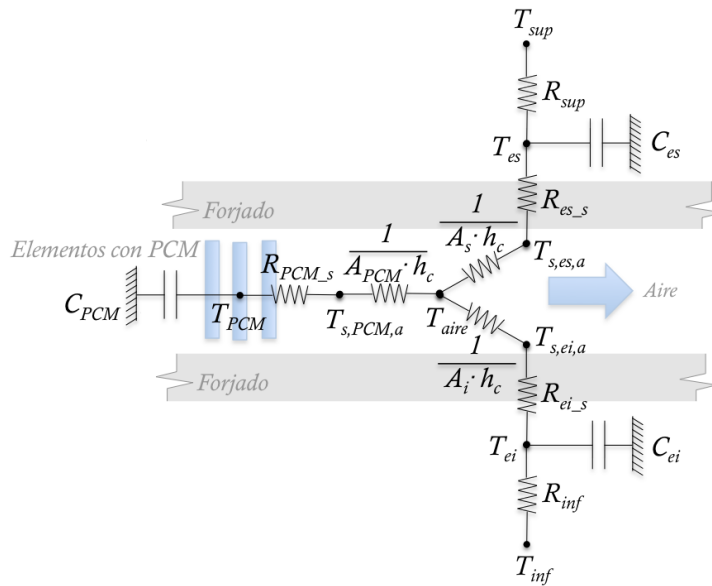


Figura 4.23: Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado primero

Para llegar a un mayor grado de simplificación se realizan los siguientes cambios:

Tomando el coeficiente convectivo  $h_c$  en el interior del conducto igual para todas las superficies y despreciando la radiación entre las distintas partes del conducto entendiend que el forjado en su parte superior e inferior tienen una temperatura muy similar, si se toma  $T_{eq,s}$  igual a la temperatura equivalente

de intercambio de calor con el aire de todas ellas, supuestas iguales, las resistencias térmicas convectivas se pueden agrupar como resistencias térmicas en paralelo.

$$\frac{1}{R_{cam}} = \frac{1}{\frac{1}{A_s \cdot h_c}} + \frac{1}{\frac{1}{A_i \cdot h_c}} + \frac{1}{\frac{1}{A_{PCM} \cdot h_c}} \quad (4.101)$$

$$\frac{1}{R_{cam}} = A_s \cdot h_c + A_i \cdot h_c + A_{PCM} \cdot h_c \quad (4.102)$$

Tomando:

$$A_{cam} = A_s + A_i + A_{PCM} \quad (4.103)$$

Como el área del alveolo:  $A_{alv} = A_s + A_i$

$$A_{cam} = A_{alv} + A_{PCM} \quad (4.104)$$

Se obtiene:

$$R_{cam} = \frac{1}{A_{cam} \cdot h_c} \quad (4.105)$$

Si se toma la hipótesis de que  $T_{eq} = T_{s,ee,a} = T_{s,ei,a} = T_{s,PCM,a}$ , se pueden agrupar las resistencias con lo que se llega al esquema simplificado representado en la Figura 4.24.

Si se toma igualmente la hipótesis simplificadora de que todo el conducto se encuentra a la misma temperatura que coincide con la de los contenedores de PCM, las resistencias térmicas igualmente pueden agruparse en una resistencia térmica equivalente conductiva superficial  $R_{eq\_s}$ . Siendo:

$$\frac{1}{R_{eq\_s}} = \frac{1}{R_{es\_s}} + \frac{1}{R_{ei\_s}} + \frac{1}{R_{PCM\_s}} \quad (4.106)$$

Con este nuevo cambio se llega al esquema simplificado representado en la Figura 4.25.

Análogamente simplificando el esquema con las resistencias en serie y las capacidades en paralelo se obtiene el siguiente esquema final simplificado representado en la figura 4.26, tomando como:

$$R_{eq\_aire} = R_{cam} + R_{eq\_s} \quad (4.107)$$



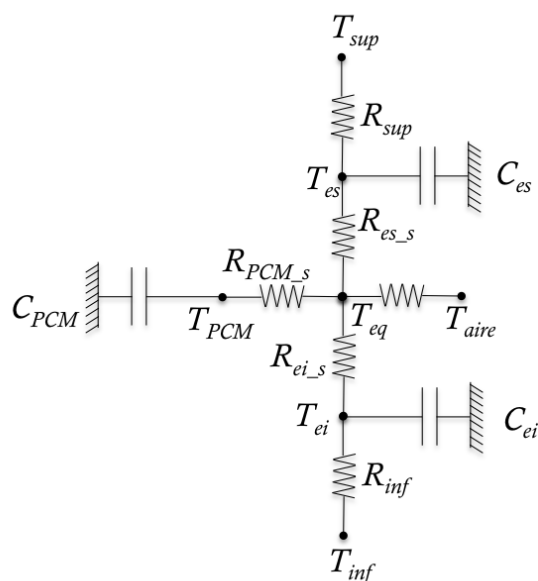


Figura 4.24: Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado segundo

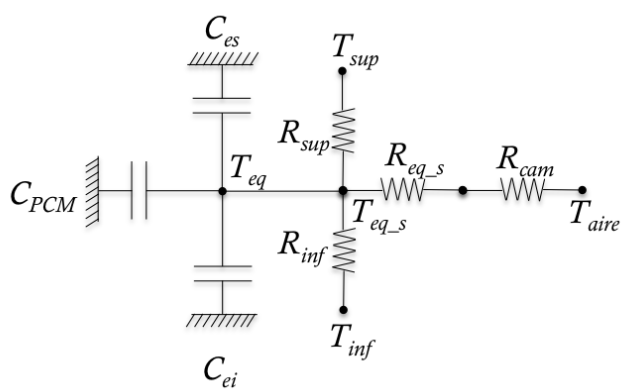


Figura 4.25: Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado tercero

$$C_{total} = C_{es} + C_{ei} + C_{PCM} = \rho_f \cdot Cp_f (V_s + V_i) + \rho_{PCM} \cdot Cp_{PCM} \cdot V_{PCM} \quad (4.108)$$

$$C_{total} = C_{es} + C_{ei} + C_{PCM} = \rho_f \cdot Cp_f \cdot V_f + \rho_{PCM} \cdot Cp_{PCM} \cdot V_{PCM} \quad (4.109)$$

Al estar compuesto el forjado básicamente del mismo material se puede poner simplificar en  $V_f$  siendo el volumen total de forjado.

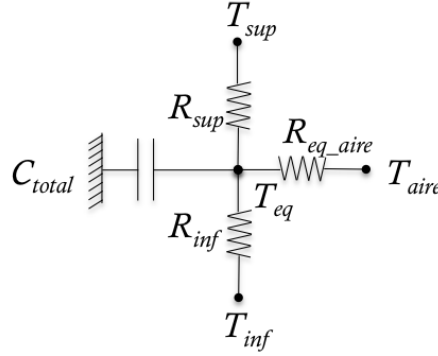


Figura 4.26: Esquema eléctrico equivalente de forjado simplificado final

El esquema representado en la figura 4.26, análogo al de fachada, se corresponde con la ecuación 4.110 siguiente:

$$\frac{1}{R_{eq\_aire}}(T_{aire} - T_{eq}) + \frac{1}{R_{sup}}(T_{sup} - T_{eq}) + \frac{1}{R_{inf}}(T_{inf} - T_{eq}) = C_{total} \cdot \frac{dT_{eq}}{dt} \quad (4.110)$$

Para calcular el término  $R_{eq\_aire}$  se procede al igual que se hizo para fachadas repartiendo la masa térmica del forjado. Si se reparte la resistencia térmica de la parte superior del forjado asignándose la mitad se obtiene:

$$R_{sup} = \frac{\frac{\overline{e_{sup}}}{2}}{K_{sup} \cdot A_{sup}} + \frac{1}{h_{sup} \cdot A_{sup}} \quad (4.111)$$

Siendo  $\overline{e_{sup}}$  el espesor medio.

Igualmente la parte inferior del forjado se puede dividir en dos mitades.

$$R_{inf} = \frac{\frac{\overline{e_{inf}}}{2}}{K_{inf} \cdot A_{inf}} + \frac{1}{h_{inf} \cdot A_{inf}} \quad (4.112)$$

Aunque se ha distinguido  $K_{sup}=K_{inf}$  y  $h_{sup}=h_{inf}$

Siendo por tanto:

$$R_{es\_s} = \frac{\frac{\overline{e_{sup}}}{2}}{K_{sup} \cdot A_{inf}} \quad (4.113)$$

$$R_{ei\_s} = \frac{\frac{\overline{e_{inf}}}{2}}{K_{inf} \cdot A_{inf}} \quad (4.114)$$

Si se hace un balance energético en el aire se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R_{eq\_aire}}(T_{aire} - T_{eq}) = \dot{m}_{aire} \cdot Cp_{aire} \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (4.115)$$

Por el funcionamiento del sistema se puede considerar en cada sección la temperatura del aire como la media entre la temperatura de entrada y de salida.

$$T_{aire} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (4.116)$$

De nuevo sustituyendo  $T_{aire}$  y despejando  $T_{out}$  en la ecuación 4.115 se obtiene:

$$T_{out} = \frac{T_{in} \left( \dot{m}_{aire} \cdot Cp_{aire} - \frac{1}{2 \cdot R_{eq\_aire}} \right) + \frac{T_{eq}(t)}{R_{eq\_aire}}}{\frac{1}{2 \cdot R_{eq\_aire}} + \dot{m}_{aire} \cdot Cp_{aire}} \quad (4.117)$$

$T_{eq}(t)$  se obtiene despejando esta variable en la ecuación 4.110 en la que se sustituye  $T_{aire}$ , y  $T_{out}$  de las anteriores.

$$T_{eq} \left( -\frac{1}{R_{eq\_aire}} - \frac{1}{R_{sup}} - \frac{1}{R_{inf}} \right) + \frac{T_{aire}}{R_{eq\_aire}} + \frac{T_{sup}}{R_{sup}} + \frac{T_{inf}}{R_{inf}} = C_{total} \cdot \frac{dT_{eq}}{dt} \quad (4.118)$$

Llamando  $a$  al término:

$$a = \frac{1}{R_{eq\_aire} + 2 \cdot R_{eq\_aire}^2 \cdot \dot{m}_{aire} \cdot Cp_{aire}} - \frac{1}{R_{eq\_aire}} - \frac{1}{R_{sup}} - \frac{1}{R_{inf}} \quad (4.119)$$

y  $b$  al término:

$$b = T_{in} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot R_{eq\_aire}} + \frac{\dot{m}_{aire} \cdot Cp_{aire} - \frac{1}{2 \cdot R_{eq\_aire}}}{1 + 2 \cdot \dot{m}_{aire} \cdot Cp_{aire} \cdot R_{eq\_aire}} \right] + \frac{T_{sup}}{R_{sup}} + \frac{T_{inf}}{R_{inf}} \quad (4.120)$$

La ecuación 4.118 toma la forma:

$$a \cdot T_{eq} + b = C_{total} \cdot \frac{dT_{eq}}{dt} \quad (4.121)$$

Siendo solución de la ecuación planteada, análoga a la de fachada:

$$T_{eq}(t) = -\frac{b}{a} + \left[ T_{eq}(t=0) + \frac{b}{a} \right] \cdot \exp\left(-\frac{a}{C_{total}} \cdot t\right) \quad (4.122)$$

Las temperaturas interior, exterior y de entrada de aire son variables. Considerando éstas constantes en cada paso de tiempo e iguales a las finales del paso anterior la ecuación tomará la forma:

$$T_{eq}(t) = -\frac{b}{a} + \left[ T_{eq}(t - \Delta t) + \frac{b}{a} \right] \cdot \exp\left(-\frac{a}{C_{total}} \cdot \Delta t\right) \quad (4.123)$$

$C_{total}$  incluye el término  $Cp_{PCM}$  dado en la ecuación 4.109.

Usando el modelo de la capacidad térmica efectiva desarrollado en el punto 4.2 el valor de  $Cp_{PCM}$  variará en función de la temperatura tomando como calor específico aparente el del PCM en estado sólido en el intervalo de temperaturas inferior al punto de fusión y un valor  $\Delta T$  y el del PCM en estado líquido en las temperaturas superiores a la del punto de fusión y un valor  $\Delta T$ .

En el cambio de fase ( $T_{cf} - \Delta T < T < T_{cf} + \Delta T$ ) el calor específico aparente tomará el valor:

$$Ca = \frac{Cp_l + Cp_s}{2} + \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta T} \quad (4.124)$$

Siendo  $\lambda$  el calor latente del PCM.

Cuando el forjado no esté en proceso de ventilación el modelo sería igual al considerando igualmente válida la ecuación 4.110. La resolución de la ecuación es análoga haciéndose  $\dot{m}_{aire} = 0$ . La  $T_{aire}$  no será la media entre las de entrada y salida.

Resolviendo la ecuación los términos  $a$  y  $b$  tomarán los siguientes valores:

$$a = \frac{1}{R_{sup}} + \frac{1}{R_{inf}} \quad (4.125)$$

$$b = \frac{T_{sup}}{R_{sup}} + \frac{T_{inf}}{R_{inf}} \quad (4.126)$$

La solución a la ecuación toma en este caso la siguiente forma, similar a la 4.123, simplificada.

$$T_{eq}(t) = \frac{T_{sup} \cdot R_{inf} + T_{inf} \cdot R_{sup}}{R_{inf} + R_{sup}} + \left[ T_{eq}(t - \Delta t) - \frac{T_{sup} \cdot R_{inf} + T_{inf} \cdot R_{sup}}{R_{inf} + R_{sup}} \right] \cdot \exp \left( -\frac{\frac{1}{R_{inf}} + \frac{1}{R_{sup}}}{C_{total}} \cdot \Delta t \right) \quad (4.127)$$

Se ha distinguido entre la parte superior del forjado y la inferior debido a que éstos no tienen por qué ser siempre elementos de separación horizontal del interior del edificio, condición en la que en condiciones normales las temperaturas superior e inferior serían iguales. Los forjados también pueden ser elementos de separación con espacios no habitables y el exterior.

## 4.4. Análisis del modelo nivel 1 de fachada

El modelo nivel 1 desarrollado se aplica a la fachada ventilada descrita que incorpora los elementos PCM en forma de aletas situadas en el interior de la cámara de aire. Las aletas son láminas rectangulares que están dispuestas entre las paredes interiores de la cámara de forma que verticalmente se permite el flujo de aire ascendente, tal y como se mostraba en la figura 4.4. Las aletas pueden ser perpendiculares al plano de los elementos exterior e interior o formar un cierto ángulo con estos. La disposición en ángulo permite

una mayor densidad de PCM.

El modelo nivel 1 es el descrito en el apartado 4.3.1 y divide verticalmente la fachada en tres partes iguales. El modelo admite diferentes configuraciones de fachada. El modelo desarrollado se corresponde con la fachada ensayada en el proyecto "MECLIDE" en cuanto a geometría, respondiendo a las mismas variables que el detallado desarrollado en el marco del proyecto, (Alvarez y otros, 2013).

Para la calibración del modelo detallado antedicho se llevaron a cabo dos campañas de experimentación. Los ensayos tuvieron lugar entre los meses de noviembre y diciembre de 2011. La estrategia operacional consistió en alternar dos ciclos de 12 horas. Durante la noche, desde las 20h hasta las 8 h del día siguiente se hizo pasar a través de la cámara aire frío procedente del exterior, durante el día de 8 horas a 20 h el aire que circuló por la cámara es procedente del interior de la misma calentado hasta aproximadamente 32 °C.

En primer término se hará un estudio de las variables que intervienen en el modelo simplificado nivel 1 para posteriormente hacer una calibración del mismo comparándolo con los valores obtenidos en el ensayo y los calculados con el método detallado.

#### **4.4.1. Análisis de las variables del modelo**

En este apartado se analizan las variables que intervienen en el cálculo. Se toma como hipótesis proponer valores teóricos adoptándolos junto con los valores reales de ensayo. Para las variables más relevantes se realizará un estudio de sensibilidad.

##### **4.4.1.1. Variables básicas**

La geometría de la fachada y su composición condiciona directamente el comportamiento de la fachada con PCM. Las variables básicas que intervienen en el modelo y que se utilizan en la calibración son las que se indican en la tabla 4.1.

La composición se corresponde con la llevada a cabo en los experimentos reales que han servido para la calibración del modelo detallado. La utilización de la misma composición de fachada elimina la incertidumbre asociada a la variación de los parámetros así fijados. La calibración del simplificado nivel 1 se realizará contra los datos del experimento y contra el modelo detallado

que ya ha sido calibrado experimentalmente.

La caracterización del PCM se realiza mediante un modelo de calor específico equivalente en función de la temperatura. Se trata de una simplificación en cuanto al comportamiento del material suficientemente válida con el objeto de su caracterización acorde con el modelo propuesto. Figura 4.27

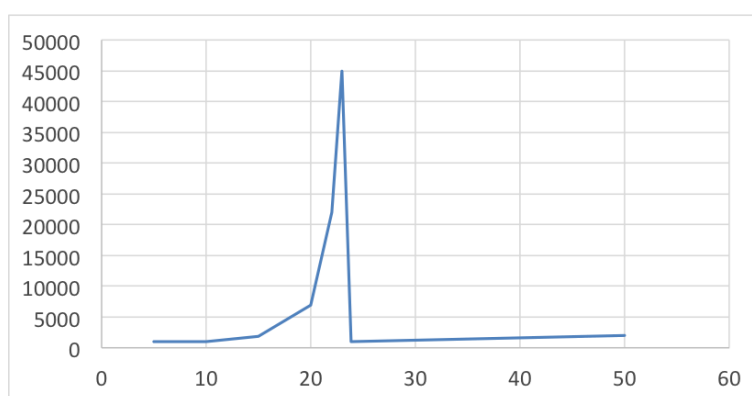


Figura 4.27: Modelo de calor específico equivalente del PCM en función de la temperatura

#### 4.4.1.2. Variables climáticas y de temperatura

El modelo tiene en cuenta el clima exterior, los datos se toman de los ficheros climáticos de los programas oficiales que se corresponden con las capitales de provincia.

Los datos necesarios son la temperatura del aire exterior, la temperatura radiante exterior y la radiación global que se obtienen de los datos disponibles horarios de temperatura exterior, radiación directa y difusa y el azimut.

La temperatura interior del modelo está fijada para los meses de invierno, (noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril) en 20°C. Para el resto se considera de 26°C.

El clima es de singular importancia en el comportamiento de la fachada puesto que incide directamente en la cantidad de energía cargada. El potencial climático se estudia en el apéndice B, página 307.

Tabla 4.1: Variables básicas que intervienen en el modelo simplificado nivel 1 de fachada con PCM

Hoja exterior: Panel aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
- La modelización completa del PCM se recoge en la figura 4.27	
Hoja interior: Fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,29
Densidad ( $kg/m^3$ )	2000
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,70



#### 4.4.1.3. Coeficientes convectivos y radiantes

Los coeficientes convectivos a usar en el modelo son los coeficientes de película del elemento exterior, dentro de la cámara y en el elemento interior.

##### **Coeficiente convectivo del elemento exterior** $hc_e$

La variabilidad del coeficiente de película es muy alta y está directamente relacionada con la velocidad del aire sobre la superficie y su dirección (Emmel y Mendes, 2005). Existen datos suministrados experimentalmente en relación con el Building Energy Simulation Test. Establecer un modelo de comportamiento de este parámetro excede el ámbito de estudio y además sería de una importancia menor para el elemento constructivo analizado.

El problema reside en la variabilidad de la velocidad del aire sobre cada una de las superficies, en el exterior de los edificios la convección es forzada. Un valor típico en simulación para elementos verticales sería  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Para los cálculos del modelo se propone  $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . El valor es conservador.

##### **Coeficiente convectivo del elemento interior** $hc_i$

En los elementos constructivos interiores de los edificios la convección es natural. Un valor típico en simulación es  $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . La convección libre en suelos puede llegar a tomar valores próximos a  $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  y en techos  $4,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Para los cálculos del modelo tomaremos  $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

##### **Coeficientes convectivos en la cámara** $hc_{ee}$ y $hc_{ei}$

Los valores a adoptar de los coeficientes convectivos dependen de la velocidad del aire y la configuración de la cámara. El problema radica en que la velocidad del aire es variable a lo largo de la cámara y consecuentemente los coeficientes de transferencia convectivos serán variables a lo largo de la fachada.

Para obtener un orden de magnitud teórico en la valoración de los coeficientes convectivos en la cámara se hará uso de la estimación del número Nusselt indicada en el apartado 4.2.1.2 basada en la correlación de Petukov que de acuerdo con Taylor es la que mejor predice el número de Nusselt para

las configuraciones de flujo existentes (Ruiz-Pardo, 2008).

$$Nu = \frac{h \cdot l}{k} \quad (4.128)$$

Siendo  $Nu$  el número de Nusselt,  $l$  el la longitud característica y  $k$  la conductividad del aire.

Para una configuración como la propuesta en la cámara de ensayo y tomando por valores medios para las variables:  $Pr = 0,71$ ,  $k = 0,024 \text{ W/mK}$ ,  $\nu = 1,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , se obtiene para una separación de aletas de  $10 \text{ cm}$  la relación entre velocidad del aire y coeficiente convectivo mostrada en la figura 4.28.

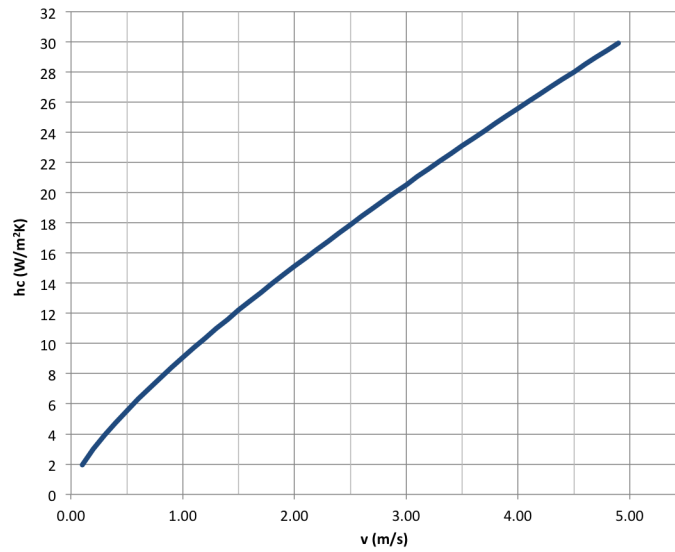


Figura 4.28: Coeficiente de calor por convección para cámara ventilada

El número de Reynolds obtenido en la aproximación estará por debajo del valor real ya que las correlaciones analizadas son para cámaras de aire diáfanas. Las aletas crearán una perturbación inicial adicional en la dirección del aire. La figura 4.29 muestra la variación del coeficiente de Nusselt y del coeficiente convectivo en función de la velocidad del aire.

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} \quad (4.129)$$

Donde:

$v$  es la velocidad de aire en la cámara (m/sg)

$D_h$  es el Diámetro hidráulico  $D_h = 2e$

$\nu$  la viscosidad cinemática

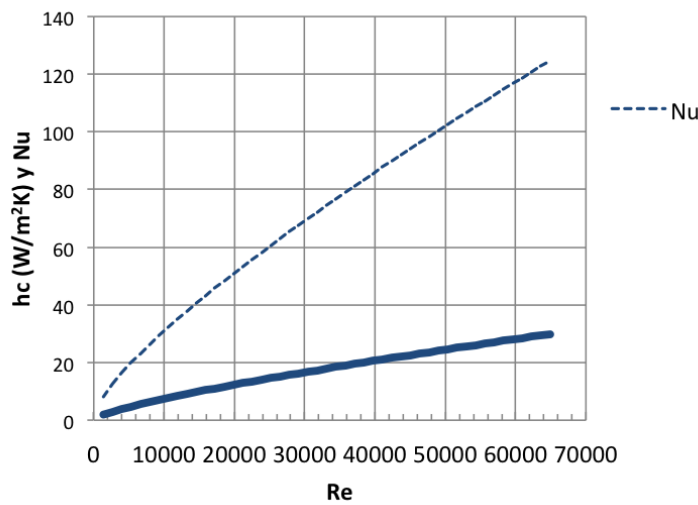


Figura 4.29: Variación del número de Nusselt y del coeficiente de transferencia convectivo para cámara ventilada

Aunque el número de Reynolds aumenta con el espesor de la cámara, para el rango de velocidades  $hc$  lo hará inversamente con la separación entre las aletas, ver figura 4.30. Para corregir el efecto de un mayor número de Reynolds para una separación entre aletas dada se debería tomar en el modelo valores del coeficiente  $hc$  algo mayores.

Esta variable es muy sensible dado que influye directamente en la transferencia tanto en la carga como en la descarga de energía. Dada la variabilidad de los coeficientes de película se obtuvieron experimentalmente en los ensayos llevados a cabo para el proyecto "MECLIDE" en Lleida.

En el ensayo se dividió la fachada en dos partes, superior e inferior y se obtuvieron para dos rangos de velocidades: 1,8 y 3,4 m/s. El resultado se

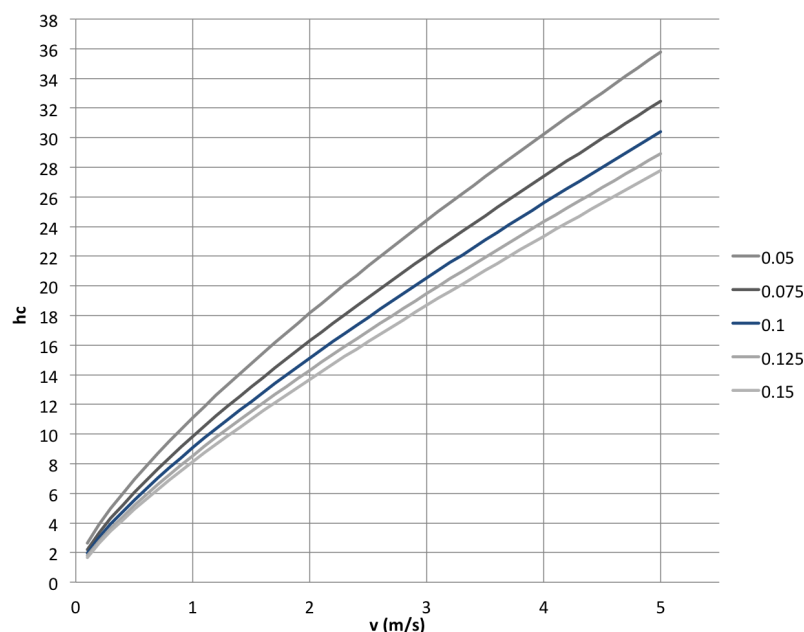


Figura 4.30: Variación del coeficiente de transferencia de calor por convección para cámara ventilada en función de la distancia entre aletas.

puede consultar en (Ruiz-Pardo y otros, 2012).

Los datos obtenidos experimentalmente se ven en la figura 4.31, en rojo corresponden con la zona inferior de la cámara, en azul la superior. El rango de velocidades en la zona inferior es superior al de la zona superior de la cámara. Los resultados de los ensayos son los indicados en la tabla 4.2

Por todo lo anterior adoptar los coeficientes de transferencia convectivos teóricos como válidos supondría sobreestimar la transferencia en la zona superior, subestimándola en la inferior de la fachada. Los valores finales a utilizar serán los resultantes de la calibración del modelo simplificado.

### **Coeficiente radiante del elemento exterior $hr_e$**

Para la estimación del coeficiente radiante exterior se toma como válida la simplificación del Código Técnico de la Edificación que establece que para cerramientos verticales en contacto con el aire exterior y con flujo horizontal  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Si tomamos el valor  $h_{ce} = 20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  indicado

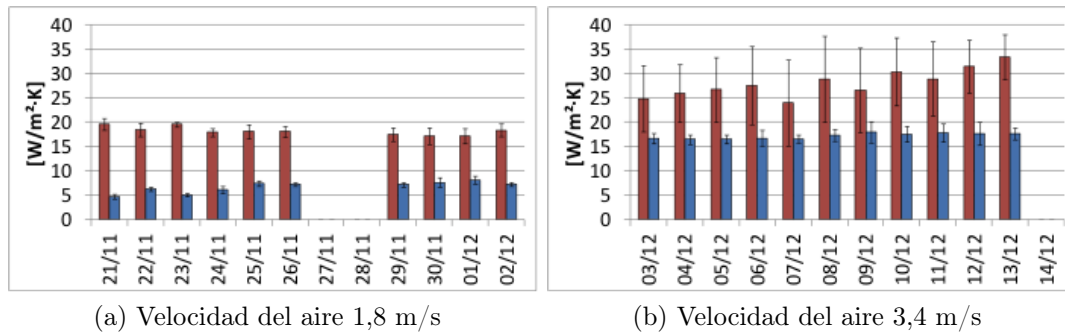


Figura 4.31: Resultados diarios de los coeficientes de transferencia convectivos de ensayo para dos velocidades

Tabla 4.2: Coeficientes de transferencia convectivos en la cámara obtenidos mediante ensayo

Velocidad 1,8 (m/s)	
Zona superior	$8 \pm 1,3 W/m^2 K$
Zona inferior	$18 \pm 1,5 W/m^2 K$
Velocidad 3,4 (m/s)	
Zona superior	$17 \pm 2,0 W/m^2 K$
Zona inferior	$28 \pm 4,0 W/m^2 K$

anteriormente resulta  $hr_e = 5 W/m^2 K$

#### Coeficiente radiante del elemento interior $hr_i$

Para la estimación del coeficiente radiante interior se toma igualmente válida la simplificación del Código Técnico de la Edificación que establece que para los cerramientos verticales en contacto con el aire exterior y con flujo horizontal  $R_{si} = 0,13 m^2 K/W$ . Si tomamos el valor  $h_{ci} = 2 W/m^2 K$  indicado anteriormente resulta  $hr_i = 5,69 W/m^2 K$

#### Coeficientes radiantes en la cámara $hr_{ij}$

Para la valoración de los coeficientes radiantes en la cámara se seguirá el mismo método indicado en el modelo detallado descrito en el apartado 4.2.1.3. Se trata de un análisis unidimensional basado en el método de Hottel.

#### 4.4.2. Funcionamiento de la cámara

El modelo propuesto contempla siguientes modos de funcionamiento:

- Funcionamiento con control horario
- Funcionamiento con control horario con condiciones adicionales
- Funcionamiento con carga invernal
- Control de sobrecalentamiento

El cálculo del modelo es horario con intervalos establecidos en función de las constantes de los condensadores. El valor mínimo del tiempo característico de los condensadores, evaluado en función de  $C_{e,i} \cdot R_{eq,i}$ , establece el intervalo máximo. Se fija además un máximo de 300 segundos con el fin de no perder precisión para valores muy altos.

##### 4.4.2.1. Control horario

El control horario se establece con el objeto de que las cargas y descargas se produzcan en un intervalo horario prefijado. Es decir no se producirá carga hasta llegada una hora del día determinada ni se prolongará pasado una hora límite. Igualmente no se producirá descarga hasta una hora prefijada, ni se continuará a partir de la hora indicada. El intervalo fijado es para la carga de 23 a 9 horas y para la descarga entre las 12 y las 19 horas según se justifica en el Apéndice B.

##### 4.4.2.2. Control horario con condiciones adicionales

Para que el funcionamiento de la cámara sea lo más parecido al de la realidad se establece un control con condiciones adicionales.

Las condiciones adicionales son condiciones operacionales superpuestas al control horario necesarias para la activación de la ventilación en la cámara. Las condiciones adicionales se regulan comparando la temperatura del PCM con la temperatura exterior.

Durante la carga la temperatura exterior debe ser inferior a la del PCM. Es decir sólo se producirá carga si la temperatura del PCM supera en un  $\Delta T$  (fijado en 1 °C) la temperatura exterior. Mediante esta condición adicional se evita que la cámara pueda perder carga cuando aumenta la temperatura

durante las primeras horas del día.

Igualmente la descarga debe producirse solo si se dan dos condiciones simultáneamente, la primera que el PCM esté frío, es decir que su temperatura no supere la máxima de consigna interior de verano menos un  $\Delta T$ , ( $26^{\circ}\text{C}-1^{\circ}\text{C}$ ) y la segunda que sea necesaria la refrigeración, es decir que la temperatura exterior sea superior a la de consigna interior ( $26^{\circ}\text{C}$ ).

Establecer un control exclusivamente por condiciones adicionales sin control horario carece en principio de utilidad, el sistema produciría cargas en momentos en los que la temperatura exterior disminuyera por debajo de la temperatura de la cámara. En la carga si no existe una diferencia significativa entre la temperatura exterior y la del PCM la eficiencia se reduce considerablemente.

#### **4.4.2.3. Carga invernal**

La carga invernal es un control adicional que activa la carga de la cámara en los meses de invierno en los momentos en los que la temperatura de la cámara sea inferior a la temperatura exterior. Para limitar la activación se pone la condición adicional de superar una determinada temperatura ( $15^{\circ}\text{C}$ ).

#### **4.4.2.4. Sobrecalentamiento**

Se produce sobrecalentamiento en los momentos en los que la temperatura de la cámara sea superior a la temperatura exterior siendo además la temperatura de ésta superior a la de consigna. Para evitar que la temperatura siga aumentando en caso de activar el control de sobrecalentamiento el modelo ordenará ventilación exterior.

En los momentos en los que la temperatura de la cámara sea superior a la de consigna pero inferior a la exterior, la cámara permanecerá parada, siendo incapaz de proporcionar refrigeración.

## **4.5. Ensayos experimentales**

Los ensayos para la calibración del modelo se han llevado a cabo en el marco del proyecto "MECLIDE" cuyo objetivo es la obtención de una solución constructiva para la envolvente de edificios basada en la integración estructural de componentes especiales que contribuyan a disminuir la deman-

da de energía del edificio además de verificar su función estructural.

Mediante la realización de los ensayos experimentales se han obtenido datos suficientes para estudiar la validez de los modelos y proceder a su calibración.

Se toma como periodo válido para la calibración los ensayos realizados durante el invierno de 2011. Las variables conocidas son la temperatura exterior y las temperaturas en varios puntos de la cámara. Al producirse la carga y descarga bajo condiciones extremas el PCM ha podido cambiar totalmente de estado en todos los periodos.

Las condiciones de calibración son las mismas que para el modelo detallado. Los resultados de la simulación y calibración se recogen en el apartado siguiente.

## 4.6. Calibración del modelo simplificado nivel 1 de fachada

Para la calibración del modelo nivel 1 se usarán los datos obtenidos en los ensayos de Lleida. En primer lugar se calibrará el modelo con los datos del experimento que tuvo lugar entre las 0h del 3 de diciembre de 2011 y las 12:15 h del 13 de diciembre de 2011. Los datos corresponden con la segunda sesión de experimentación.

La velocidad del aire fue aproximadamente de  $3,5 \text{ m/s}$  que se corresponde con un flujo de aire de aproximadamente  $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ . La velocidad del aire varía en la cámara en función de la altura. En la zona inferior es más alta que en la superior. El modelo supone una velocidad constante media a lo largo de la cámara.

Las variables más significativas que controlan el modelo son la velocidad del aire, el espesor que se tiene en cuenta para calcular la inercia térmica de los elementos interior y exterior  $E_{cap}$  y los coeficientes de transferencia de calor por convección en los elementos interiores de la cámara  $hc$ .

Las variables a ajustar en la calibración son la temperatura de salida de la cámara  $T_{out}$ , y la temperatura del material PCM en las tres secciones



$T_{PCM}(1)$ ,  $T_{PCM}(2)$  y  $T_{PCM}(3)$ .

En un primer tanteo se observa que la correlación en todas las variables mejora al aumentar la velocidad. En caso de los coeficientes de película, la correlación mejora al aumentar el valor del correspondiente a la sección considerada, disminuyendo a partir de un determinado punto. Las variables no son independientes entre sí. Se hará el estudio para dos velocidades, 3,5 m/s y 4,0 m/s. El modelo finalmente se ajustará para la primera de ellas.

La calibración se realiza haciendo una tanda de simulaciones consecutivas haciendo variar una o varias variables, manteniendo las demás constantes. La calibración se dará por válida cuando se consiga un valor suficientemente aproximado al obtenido tanto contra los valores de ensayo como contra los valores calculados a través del modelo detallado. Debe tenerse en cuenta que se trata de calibrar un modelo simplificado y las simplificaciones siempre traen consigo pérdida de precisión que como se verá no es significativa y está suficientemente justificada a cambio de permitir una mayor velocidad de cálculo.

El resultado de la calibración del modelo detallado proporcionó un coeficiente de correlación contra el ensayo de 0,999 en  $T_{out}$ , 0,994 en la sección inferior y 0,985 en la superior.

La primera variable que se pretende estabilizar en el modelo simplificado nivel 1 es el espesor tomado para la capacidad del muro interior. Se varía la velocidad de aire en la cámara desde 3,0 m/s y 4,0 m/s. Los coeficientes  $hc$  que se toman son los proporcionados por el ensayo para los valores superior e interior de  $28 \text{ W/m}^2\text{K}$  y  $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ , respectivamente. La capacidad relacionada con el elemento exterior permanecerá constante siendo la correspondiente a la mitad del espesor total.

Los resultados de este proceso se pueden ver en la figura 4.32 en la que se observa que al aumentar la inercia del muro mejora la correlación con las temperaturas del PCM, aunque empeora ligeramente la correspondiente a la temperatura de salida. Se tomará como válido para la variable  $E_{cap} = 0,05 \text{ m}$ .

Con este valor se obtienen los coeficientes de correlación indicados en la tabla 4.3. En la fila experimento se indica el valor del coeficiente de correlación de la simulación contra los valores experimentales, en la detallado contra la simulación mediante el método detallado.

Aunque por los coeficientes obtenidos la calibración pudiera darse ya por válida, a modo de estudio de sensibilidad de las variables y con el fin de tra-

Tabla 4.3: Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración inicial

Velocidad= 3,5 (m/s) $hc(1)=28 W/m^2K$ $hc(2)=hc(3)=17 W/m^2K$				
Coef. Correlación	$T_{out}$	$T_{PCM}(1)$	$T_{PCM}(2)$	$T_{PCM}(3)$
Experimento	0.994	0.995	0.986	0.991
Detallado	0.992	0.998	0.999	0.981

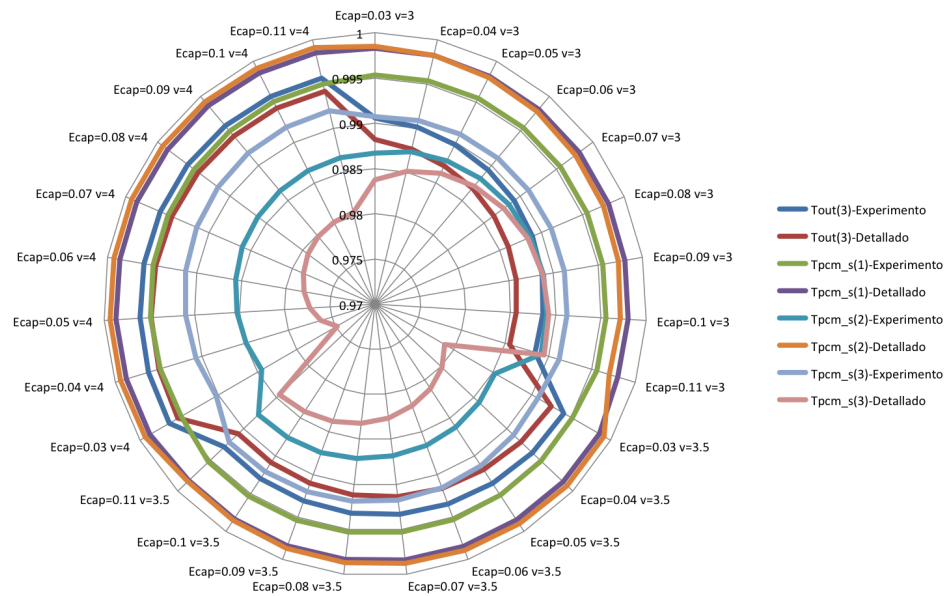


Figura 4.32: Simulación de casos para la obtención del espesor para capacidad del muro interior

tar de mejorarlo en lo posible se hacen un conjunto de simulaciones variando los coeficientes de transferencia convectivos. La simulación se recoge en la figura 4.33. Se hace variar  $hc$  en la sección inferior entre 26 y 30, las sección intermedia y superior entre 15 y 19. La correlación es bastante estable en todos los indicadores excepto en el correspondiente a  $T_{PCM}(3)$ , al que resulta muy sensible.

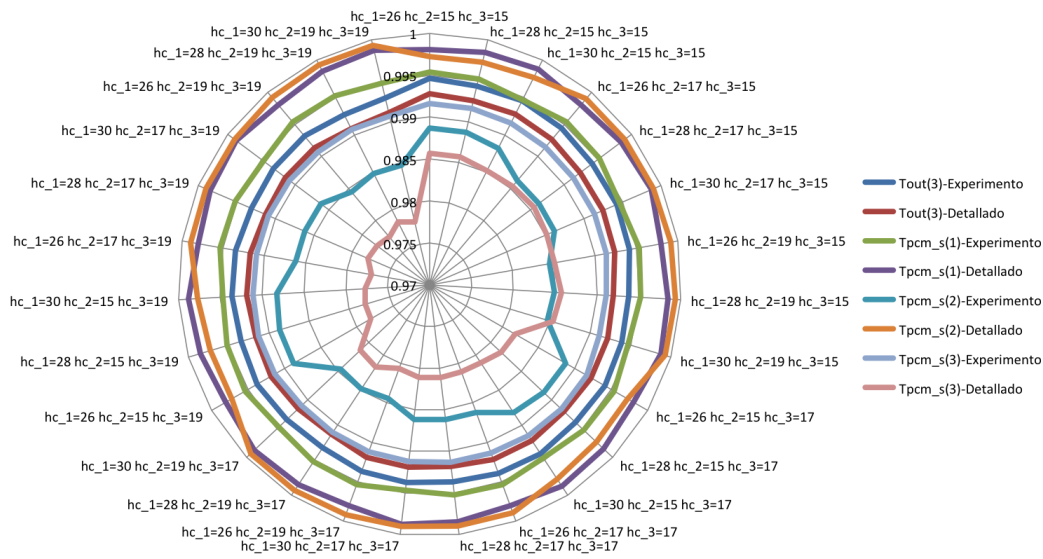


Figura 4.33: Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de  $hc$ , valores de ensayo

Para comprobar el comportamiento de las variables por separado, se realiza un análisis de sensibilidad en  $hc$ . Se realiza para dos velocidades, 3, 5  $m/s$  y 4, 0  $m/s$ . Se hace variar  $hc$  en la sección inferior entre 18 y 30, la sección intermedia y superior entre 8 y 20. Los resultados pueden verse en las figuras 4.34, 4.35 y 4.36. Como se puede observar todos los indicadores están por encima de 0,99 a excepción de  $T_{PCM}(2)$  que mejora considerablemente al estar  $hc$  en el entorno de 11.

Por último y para finalizar la calibración, dado que las variables no son independientes se hace una nueva simulación combinada similar a la inicial. Se hace variar  $hc$  en la sección inferior entre 22 y 26, las sección intermedia

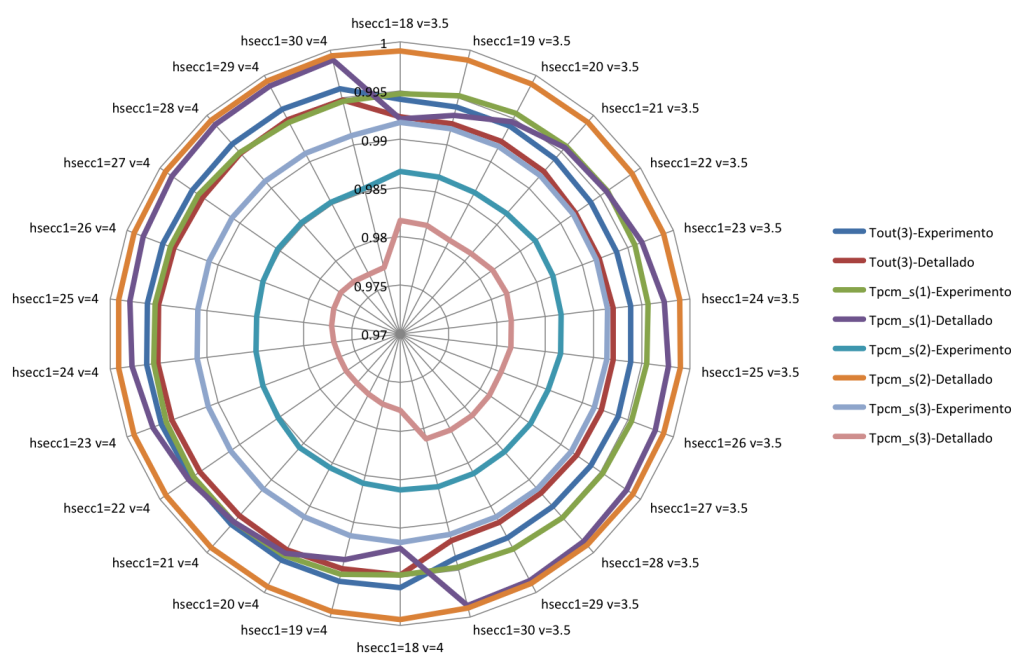


Figura 4.34: Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de  $hc(1)$

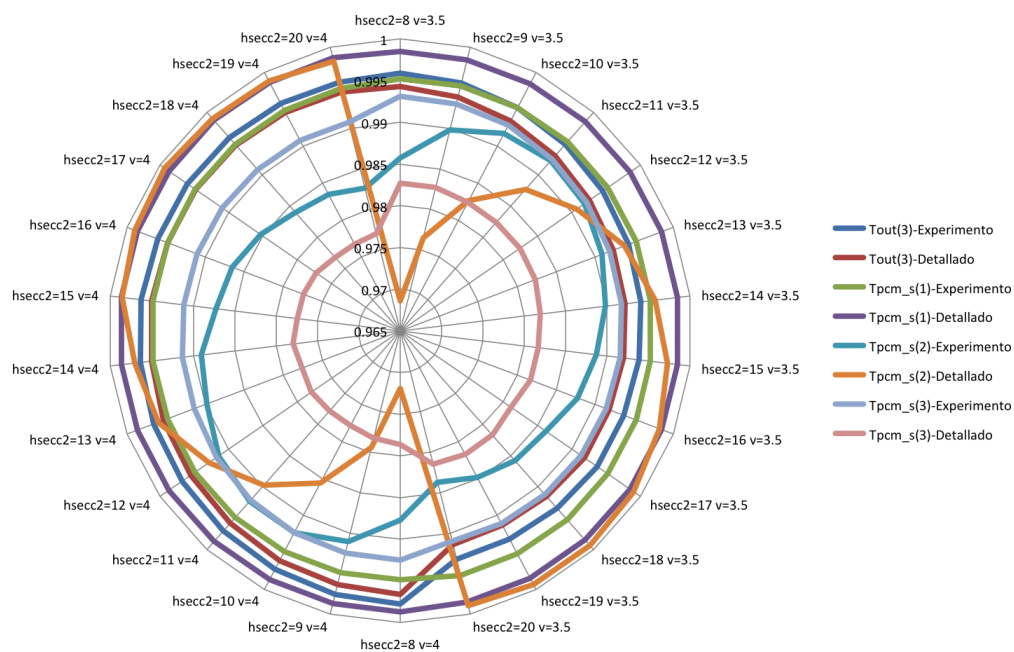


Figura 4.35: Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de  $hc(2)$

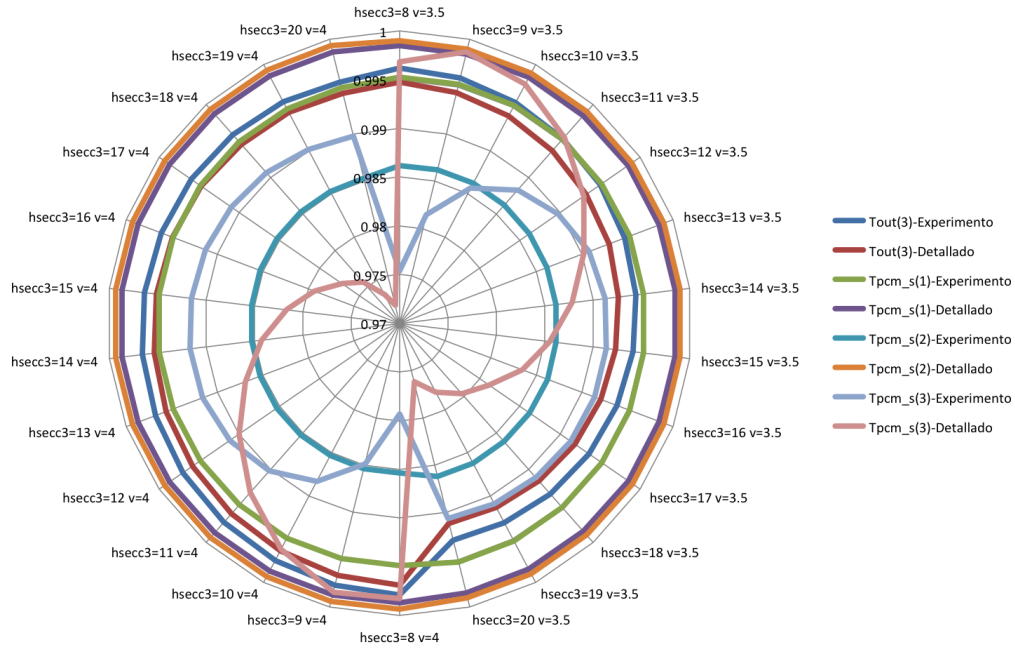


Figura 4.36: Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de  $hc(3)$

y superior entre 11 y 15. Los resultados pueden verse en la figura 4.37.

Como conclusión puede afirmarse que los resultados no difieren mucho de la primera aproximación. Se considera que la mejor respuesta para el modelo simplificado nivel 1 se obtiene con valores algo inferiores a los coeficientes de transferencia obtenidos de los datos de ensayo. Se propone para velocidad de  $3,5 m/s$  como coeficientes  $hc$   $24 W/m^2K$  para la sección inferior y  $13 W/m^2K$  para la media y superior, ya que proporcionan una correlación en todos los parámetros superior a 0,99.

En el resto de simulaciones se utilizarán estos valores en los cálculos con velocidad igual a  $3,5 m/s$ , considerándose calibrado el modelo para esta velocidad. Los resultados de los coeficientes de correlación indicados en la tabla 4.4:

En la figura 4.38 se muestra un gráfico que compara la temperatura de salida con la del método detallado y la del ensayo. El gráfico recoge también la temperatura de entrada en la cámara y las temperaturas exterior e interior.

Las figuras 4.39, 4.40 y 4.41, recogen gráficos de las temperaturas del PCM en las distintas secciones:  $T_{PCM}(1)$ ,  $T_{PCM}(2)$  y  $T_{PCM}(3)$

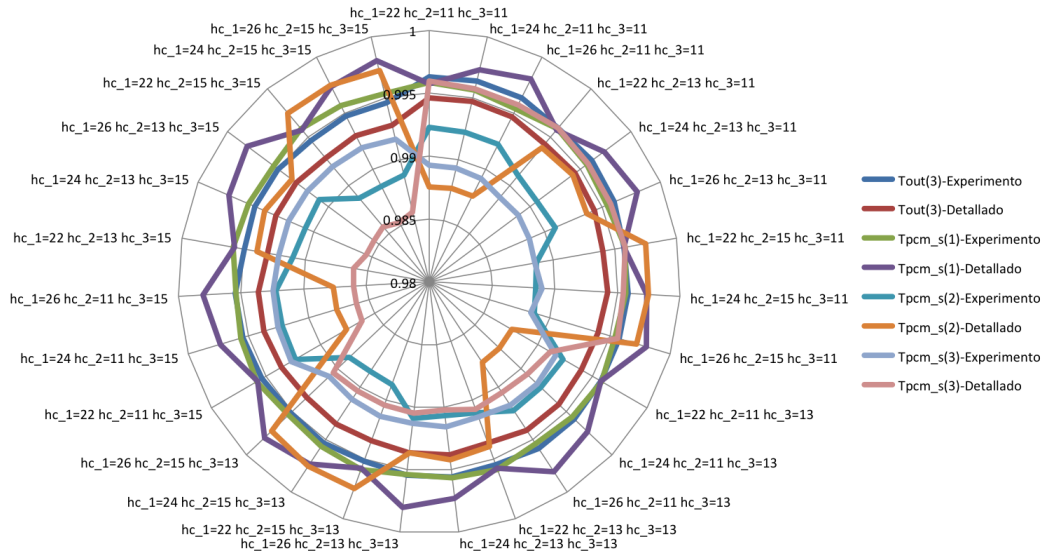


Figura 4.37: Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de hc, ajuste final

Tabla 4.4: Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración final.

Velocidad= 3,5 (m/s) hc(1)=24 W/m <sup>2</sup> K hc(2)=hc(3)=13 W/m <sup>2</sup> K				
Coef. Correlación	$T_{out}$	$T_{PCM}(1)$	$T_{PCM}(2)$	$T_{PCM}(3)$
Experimento	0.996	0.996	0.991	0.992
Detallado	0.994	0.997	0.994	0.990

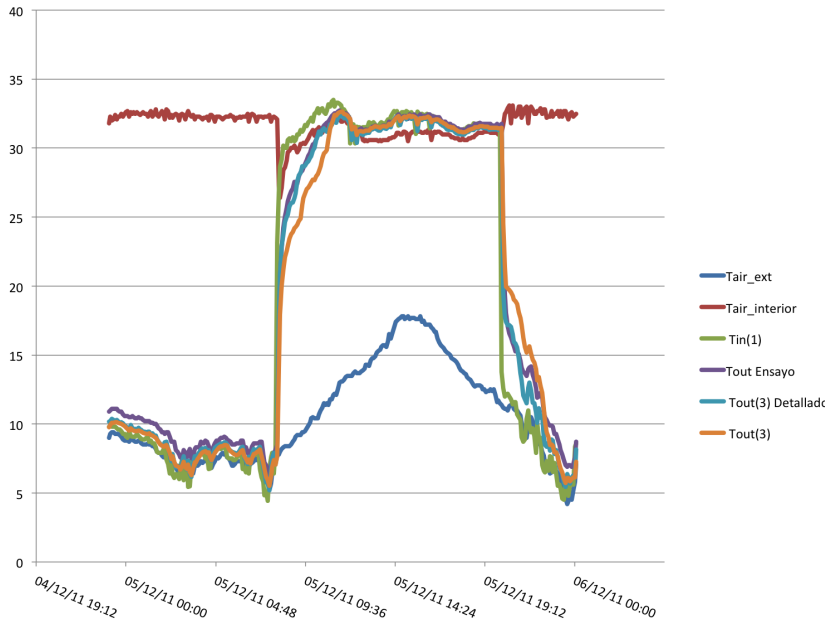


Figura 4.38: Temperatura de salida Tout. Calibración diciembre

Del mismo modo se usan los datos del ensayo realizado en el mes de noviembre. El experimento tuvo lugar entre las 10:30 horas del 21 de noviembre y las 10:15 horas del 2 de diciembre. En esta experimentación la velocidad del aire fue aproximadamente de  $1,8 m/s$  lo que corresponde con un flujo de aire de  $0,5 m^3/s$ .

El resultado de la calibración del modelo detallado proporcionó coeficientes de correlación contra el ensayo de 0,991 en  $T_{out}$ , 0,997 en la sección inferior y 0,994 en la superior.

Al igual que en la calibración con respecto al periodo de diciembre se observa que la correlación en todas las variables mejora al aumentar la velocidad.

En caso de los coeficientes de película, la correlación mejora igualmente al aumentar el valor del correspondiente a la sección considerada, disminuyendo a partir de un determinado punto. Las variables no son independientes entre sí. Se hará el estudio para dos velocidades,  $1,8 m/s$  y  $2,0 m/s$ . El modelo finalmente se ajustará para la segunda.

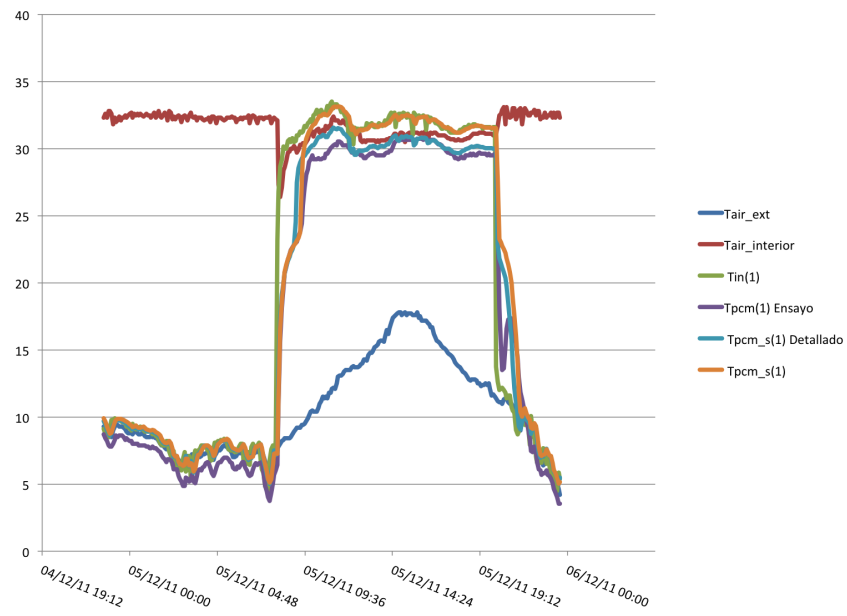


Figura 4.39: Temperatura del PCM en la sección 1, inferior. Calibración diciembre

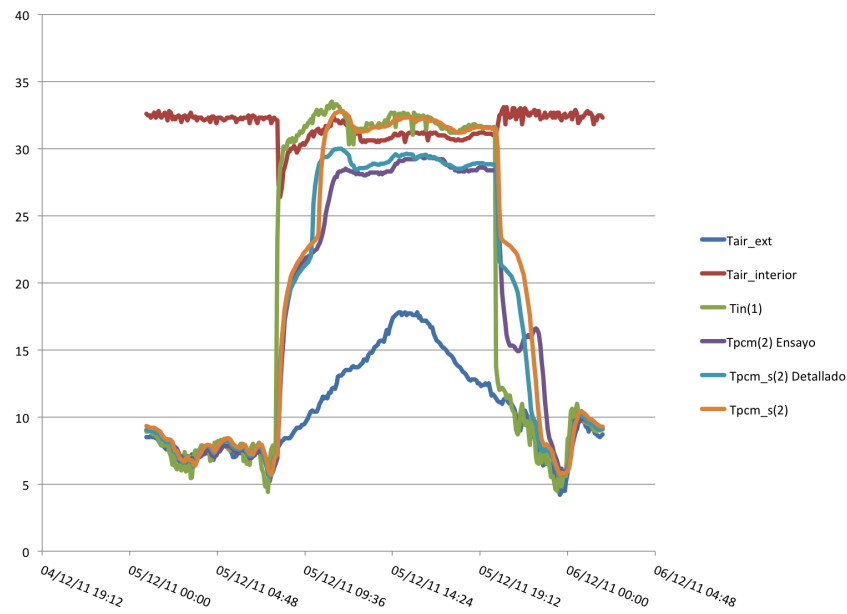


Figura 4.40: Temperatura del PCM en la sección 2, media. Calibración diciembre



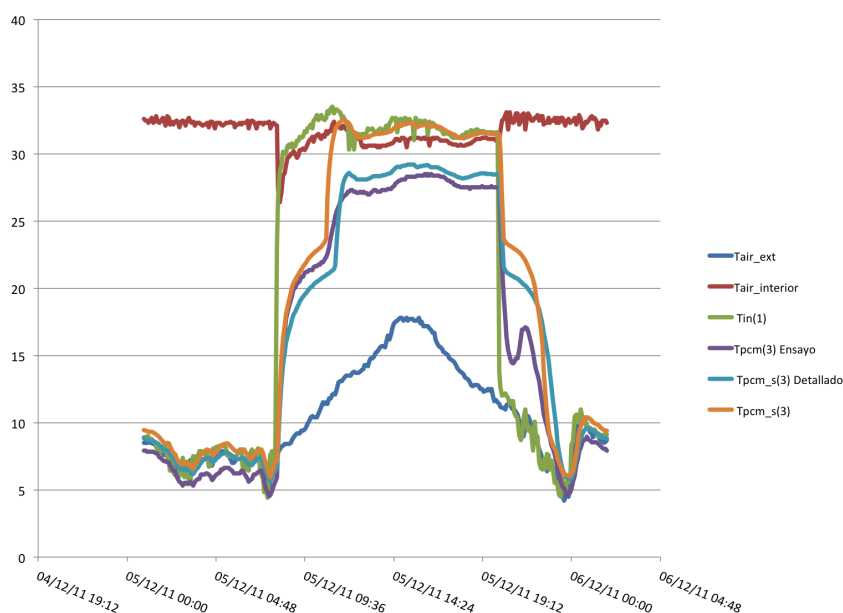


Figura 4.41: Temperatura del PCM en la sección 3, superior. Calibración diciembre

La primera variable que se pretende estabilizar en el modelo simplificado nivel 1 es el espesor tomado para la capacidad del muro interior. Se varía la velocidad de aire en la cámara desde  $1,8\text{ m/s}$  y  $2,2\text{ m/s}$ . Los coeficientes  $hc$  que se toman son los proporcionados por el ensayo para los valores superior e interior de  $18\text{ W/m}^2\text{K}$  y  $8\text{ W/m}^2\text{K}$ , respectivamente.

Los resultados de este proceso se pueden ver en la figura 4.42 en la que se observa que el modelo responde mejor con valores de  $E_{cap}$  bajos. Esto puede ser debido a que con velocidades bajas se movilice menos la inercia térmica del muro interior y del elemento exterior. Se puede tomar como válido para la variable  $E_{cap} = 0,01\text{ m}$ . La diferencia no obstante es pequeña.

Con este valor se obtienen los coeficientes de correlación indicados en la tabla 4.5. En la fila experimento se indica el valor del coeficiente de correlación de la simulación contra los valores experimentales, en la detallado, contra la simulación mediante el método detallado.

Igualmente a como se hizo en la primera calibración se hace un análisis de sensibilidad de las variables con el fin de tratar de mejorarlo en lo posible. Se

Tabla 4.5: Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración inicial. Noviembre

Velocidad= 2,0 (m/s) $hc(1)=18 \text{ W/m}^2\text{K}$ $hc(2)=hc(3)=8 \text{ W/m}^2\text{K}$				
Coef. Correlación	$T_{out}$	$T_{PCM}(1)$	$T_{PCM}(2)$	$T_{PCM}(3)$
Experimento	0.989	0.990	0.977	0.969
Detallado	0.990	0.987	0.956	0.978

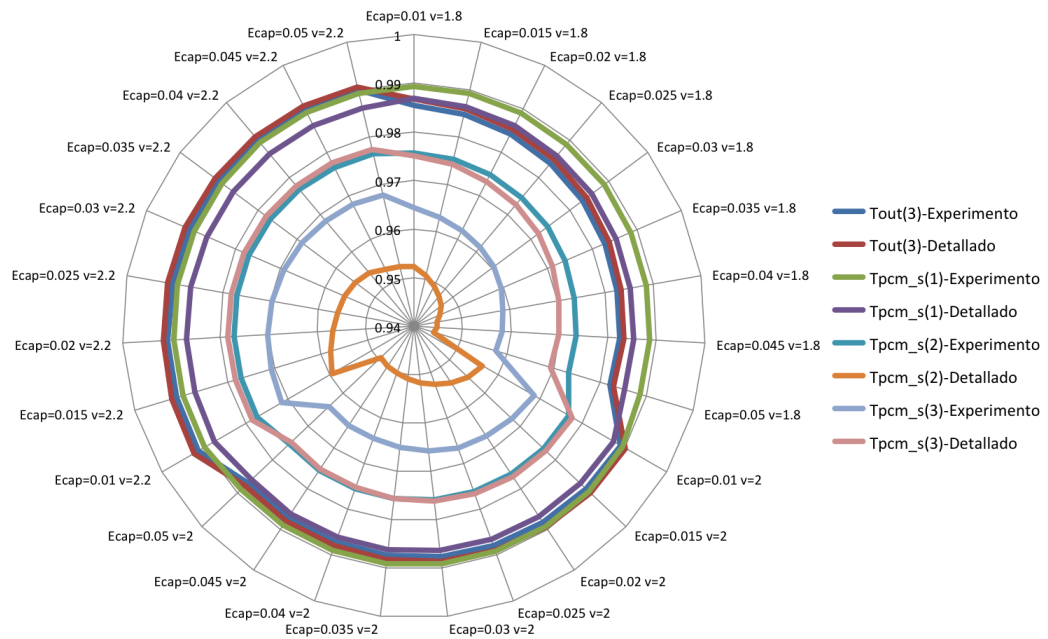


Figura 4.42: Simulación de casos para la obtención del espesor para capacidad del muro interior

varían los coeficientes de transferencia convectivos. La simulación se recoge en la figura 4.43. Se hace variar  $hc$  en la sección inferior entre 14 y 18, las sección intermedia y superior entre 6 y 10. La simulación indica que podría utilizarse un valor de  $hc$  algo inferior en la primera sección y algo superior en las demás. Pero las diferencias no son lo suficientemente importantes como para variarlo. Por ello se da el modelo por calibrado conforme al experimento y el modelo detallado. En la tabla 4.6 se recogen los valores obtenidos en esta segunda aproximación. Los gráficos se realizarán con la primera, es decir con los valores de ensayo.

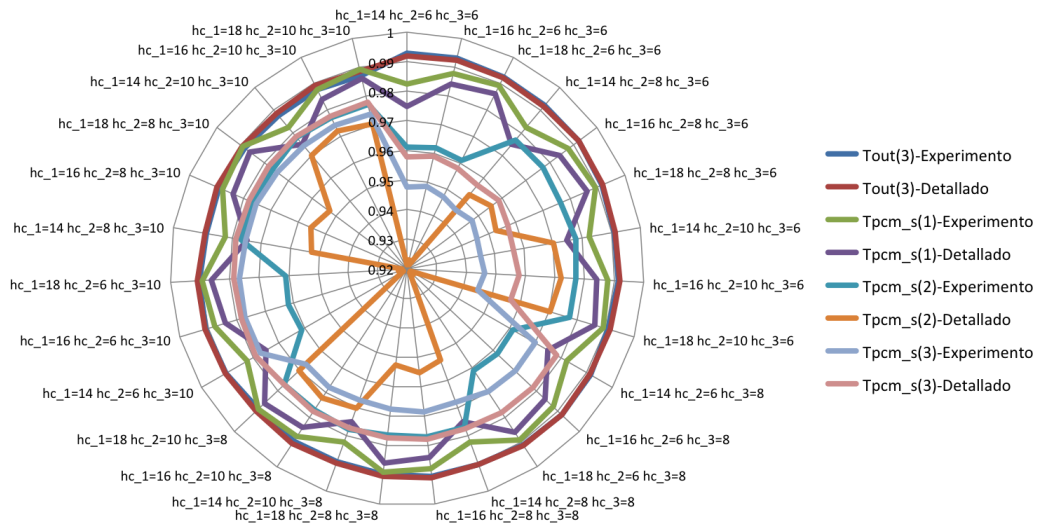


Figura 4.43: Simulación de casos para el análisis de sensibilidad de  $hc$ , valores de ensayo

En la figura 4.44 se muestra un gráfico que compara la temperatura de salida con la del método detallado y la del ensayo. El gráfico recoge también la temperatura de entrada en la cámara y las temperaturas exterior e interior.

Las figuras 4.45, 4.46 y 4.47, recogen gráficos de las temperaturas del PCM en las distintas secciones:  $T_{PCM}(1)$ ,  $T_{PCM}(2)$  y  $T_{PCM}(3)$

Tabla 4.6: Coeficientes de correlación Simplificado nivel 1. Calibración final. Noviembre

Velocidad= 2,0 (m/s) hc(1)=18 W/m <sup>2</sup> K hc(2)=hc(3)=8 W/m <sup>2</sup> K				
Coef. Correlación	$T_{out}$	$T_{PCM}(1)$	$T_{PCM}(2)$	$T_{PCM}(3)$
Experimento	0.987	0.989	0.977	0.973
Detallado	0.988	0.986	0.970	0.978

Velocidad= 2,0 (m/s) hc(1)=16 W/m <sup>2</sup> K hc(2)=6 W/m <sup>2</sup> K y hc(3)=10 W/m <sup>2</sup> K				
Coef. Correlación	$T_{out}$	$T_{PCM}(1)$	$T_{PCM}(2)$	$T_{PCM}(3)$
Experimento	0.991	0.988	0.962	0.977
Detallado	0.991	0.984	0.923	0.978

Velocidad= 2,0 (m/s) hc(1)=16 W/m <sup>2</sup> K hc(2)=hc(3)=10 W/m <sup>2</sup> K				
Coef. Correlación	$T_{out}$	$T_{PCM}(1)$	$T_{PCM}(2)$	$T_{PCM}(3)$
Experimento	0.988	0.988	0.977	0.974
Detallado	0.989	0.984	0.972	0.978

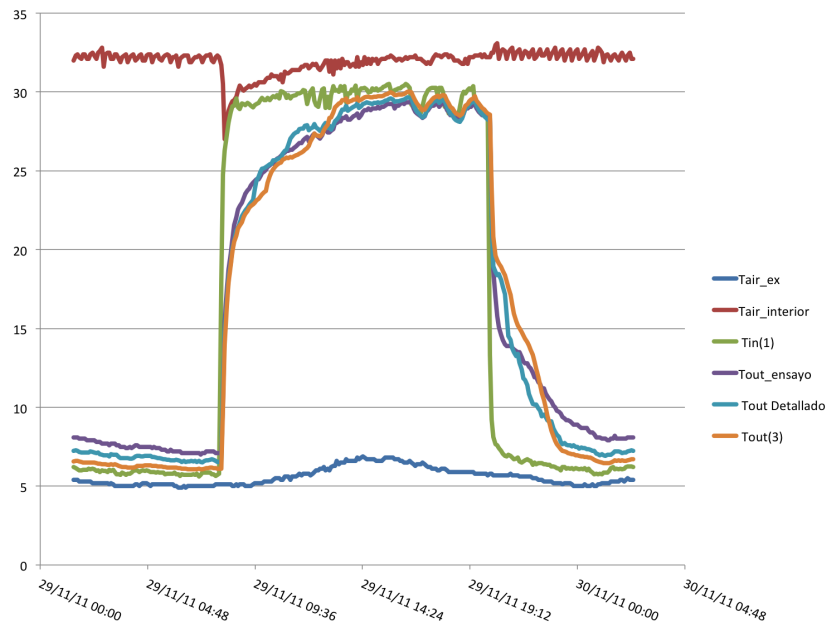


Figura 4.44: Temperatura de salida Tout. Calibración noviembre

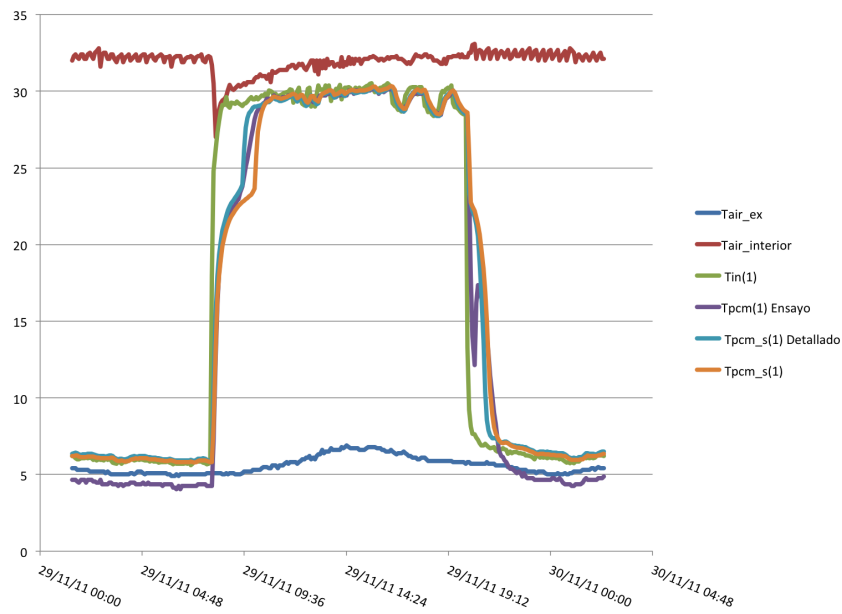


Figura 4.45: Temperatura del PCM en la sección 1, inferior. Calibración noviembre

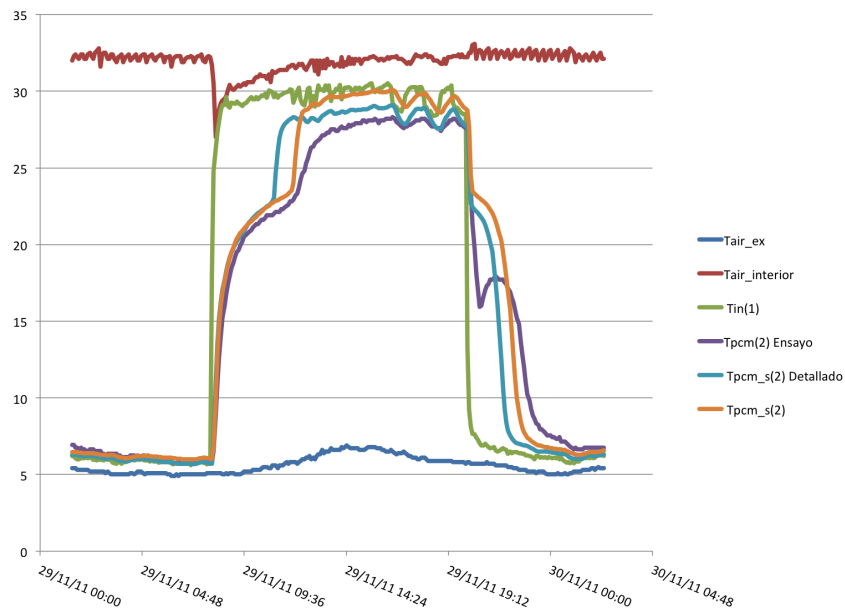


Figura 4.46: Temperatura del PCM en la sección 2, media. Calibración noviembre

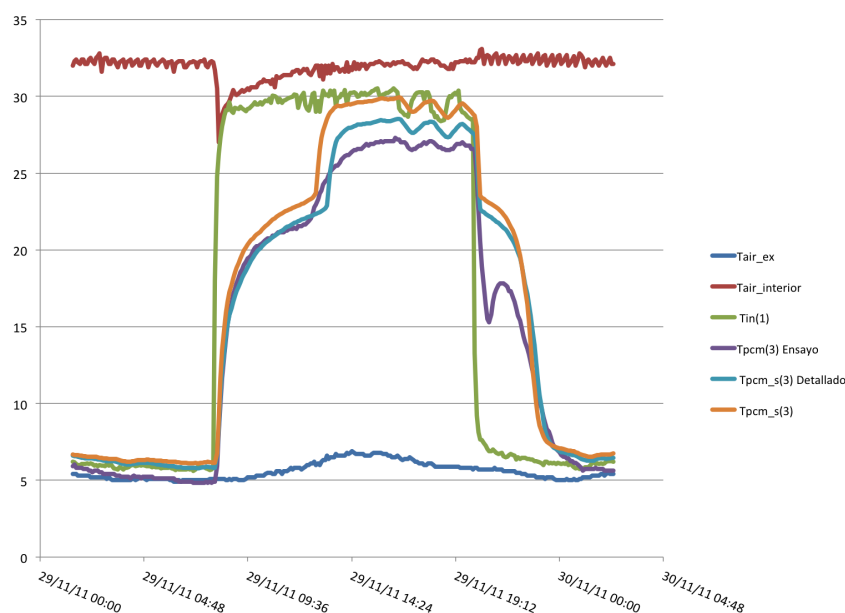


Figura 4.47: Temperatura del PCM en la sección 3, superior. Calibración noviembre

## 4.7. Modelos simplificados nivel 2

Los modelos nivel 2 se realizan con el objetivo de poder simular el comportamiento de un sistema de forma suficientemente fiable sin necesidad de conocer todas las características del mismo.

La simplificación supone no solo agilizar el tiempo de cálculo sino limitar el número de variables a un conjunto de valores relevantes que permitan agilizar la toma de decisiones a la hora de decidir entre las distintas configuraciones posibles. Mediante sistemas nivel 2 se pueden estandarizar parámetros y proporcionar valores por defecto que permitan simular sin tener que realizar el dimensionado de todo el sistema.

Disponer de modelos simplificados a nivel de estudio previo o anteproyecto permite buscar la solución óptima que luego se desarrollará a nivel de proyecto.

El problema a la hora de abordar un modelo simplificado nivel 2 es disponer de un conjunto suficientemente grande de casos resueltos con los que poder comparar el mismo en distintas situaciones. El objetivo de este aparta-

do no es el desarrollo del modelo nivel 2 sino apuntar las bases y variables de las que el nivel 2 debe depender, de modo que a través del modelo simplificado nivel 1 propuesto se puedan proporcionar suficientes datos.

#### 4.7.1. Intercambiadores regenerativos

La semejanza de los sistemas de acumulación por cambio de fase con los intercambiadores regenerativos es clara. Un intercambiador regenerativo basa su funcionamiento en extraer energía térmica de un fluido caliente que activa una masa térmica llamada matriz para posteriormente, en otro ciclo, devolver parte de esta energía a otro frío.

La teoría de intercambiadores regenerativos está ampliamente estudiada (Hewitt y otros, 1994) y excede el objetivo de esta tesis salvo en su comparación y para su aplicación en los sistemas de almacenamiento mediante PCM. La similitud radica en que análogamente a como se hace en este tipo de dispositivos existe un fluido (aire) que al pasar por el elemento estructural modifica su estado térmico para posteriormente ser utilizado como sumidero térmico. La diferencia fundamental radica en el hecho de que en un intercambiador regenerativo habitualmente se puede variar el periodo de carga para mejorar el rendimiento lo que en el caso que nos ocupa es más complejo.

En cualquier caso por su aplicabilidad a la hora de estudiar los rendimientos se describirá sucintamente el modelo de funcionamiento del regenerador. Suponiendo una conductividad infinita el modelo matemático de regenerador es el expuesto en la ecuación 4.130 para la corriente fluida y en la 4.131 para el sólido matriz.

$$h_c \cdot A \cdot (T_{sólido} - T_{fluido}) = \dot{m}_f \cdot C_f \cdot L \cdot \frac{\partial T_{fluido}}{\partial x} + m_f \cdot C_f \cdot \frac{\partial T_{fluido}}{\partial t} \quad (4.130)$$

$$h_c \cdot A \cdot (T_{sólido} - T_{fluido}) = m_m \cdot C_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (4.131)$$

Siendo:

$h_c$  los coeficientes de transferencia de calor en  $W/m^2K$   
 $A$  el área de transferencia en  $m^2$   
 $\dot{m}_f$  la masa de fluido por unidad de tiempo  $kg/s$   
 $m_m$  la masa de sólido en  $kg$

$C_f$  el calor específico del fluido en  $J/kgK$   
 $C_m$  el calor específico del sólido en  $J/kgK$   
 $L$  la longitud del intercambiador en  $m$

Tanto para la carga como en la descarga.

El modelo se caracteriza a través de dos parámetros adimensionales  $\Lambda$  llamado longitud reducida y  $\Pi$ , tiempo reducido que vienen dados por las ecuaciones 4.132 y 4.133.

$$\Lambda = \frac{h_c \cdot A}{\dot{m}_f \cdot C_f} \quad (4.132)$$

$$\Pi = \frac{h_c \cdot A \cdot (P - \frac{L}{v})}{m_m \cdot C_m} \quad (4.133)$$

Siendo:

$v$  la velocidad del fluido en  $m/s$   
 $P$  la duración de la carga o descarga en segundos

Para un intercambiador estático, en el que los procesos de carga y descarga se hacen separados, se dice que estará equilibrado si la energía cargada coincide con la descargada en cada ciclo. El intercambiador será simétrico si  $\Lambda_{Carga} = \Lambda_{Descarga}$  y estará equilibrado si  $\frac{\Lambda_{Carga}}{\Pi_{Carga}} = \frac{\Lambda_{Descarga}}{\Pi_{Descarga}}$ .

En general los rendimientos de los intercambiadores regenerativos se evalúan a través de la temperatura de entrada y salida en la carga y descarga mediante las expresiones 4.134 y 4.135.

$$\eta_{carga} = \frac{T_{in}(carga) - T_{out}(carga)}{T_{in}(carga) - T_{in}(descarga)} \quad (4.134)$$

$$\eta_{descarga} = \frac{T_{out}(descarga) - T_{in}(descarga)}{T_{in}(carga) - T_{in}(descarga)} \quad (4.135)$$

Siendo el rendimiento del regenerador el dado por la expresión 4.136

$$\eta_{regenerador} = \frac{1}{\frac{1}{2} \left( \frac{1}{\eta_{carga}} + \frac{1}{\eta_{descarga}} \right)} \quad (4.136)$$

Esquemáticamente un intercambiador regenerativo responderá a los estados de carga y descarga como se indica en la figura 4.48. Se trata de un



modelo ideal de conductividad infinita en el sólido. La temperatura de entrada y salida del fluido es constante y variación de la temperatura del fluido es constante a lo largo del intercambiador. Nótese que denomina carga al periodo con temperaturas bajas y descarga en temperaturas altas, siendo por tanto un sistema de refrigeración.

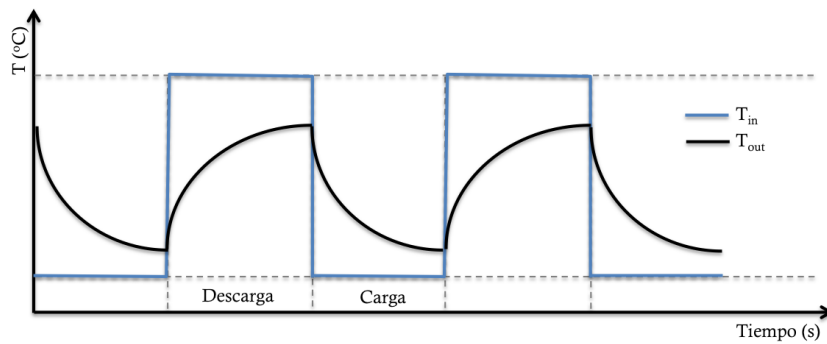


Figura 4.48: Gráfico esquemático de intercambiador regenerativo ideal

Si en el intercambiador hubiera periodos de parada y pérdidas respondería a una figura tal como la 4.49. Si se eliminan del gráfico los periodos de parada podría seguir utilizándose un esquema de carga, descarga similar al anterior. Figura 4.50.

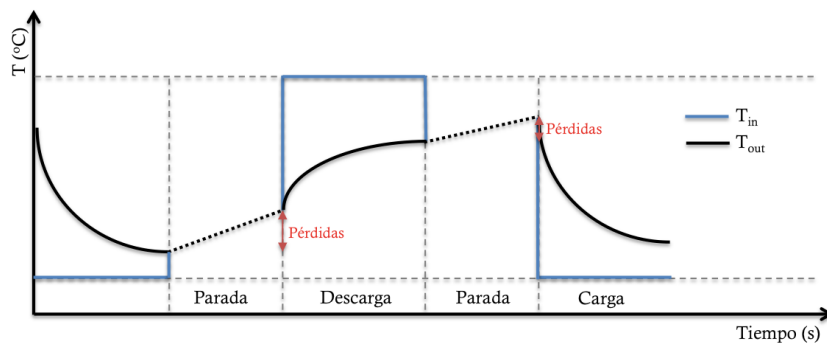


Figura 4.49: Gráfico esquemático de intercambiador regenerativo con paradas

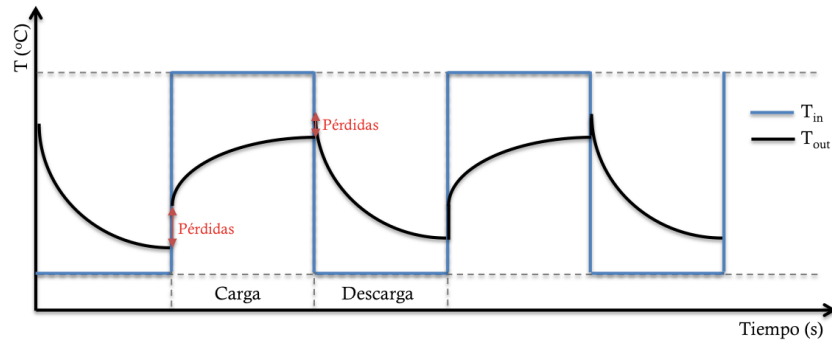


Figura 4.50: Gráfico esquemático de intercambiador regenerativo sin paradas dibujadas

El sistema de fachada objeto de la tesis se podría por tanto ver como un intercambiador de tipo regenerativo estático. El intercambiador podrá ser simétrico si las velocidades de carga y descarga son iguales pero difícilmente será balanceado a no tener porqué coincidir los periodos de carga y descarga. Además existirían siempre pérdidas. En la figura 4.51 se puede ver un esquema de carga y descarga de la fachada expresado en los mismos términos.

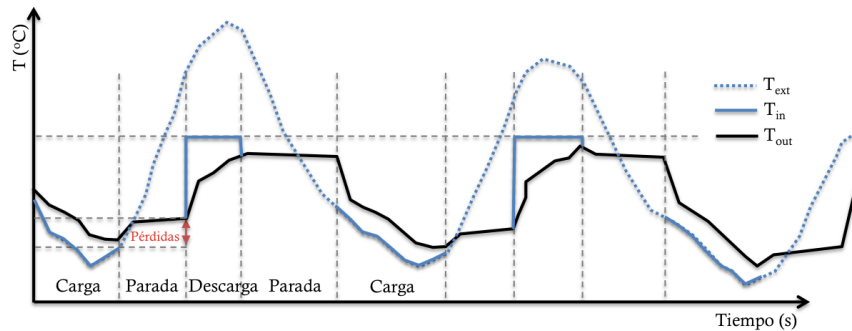


Figura 4.51: Gráfico esquemático de fachada como intercambiador

Si se eliminan los periodos de parada, ver figura 4.52, el intercambiador en forma respondería a un esquema similar al de un intercambiador regenerativo.

La peculiaridad de contener un material de cambio de fase no impide el

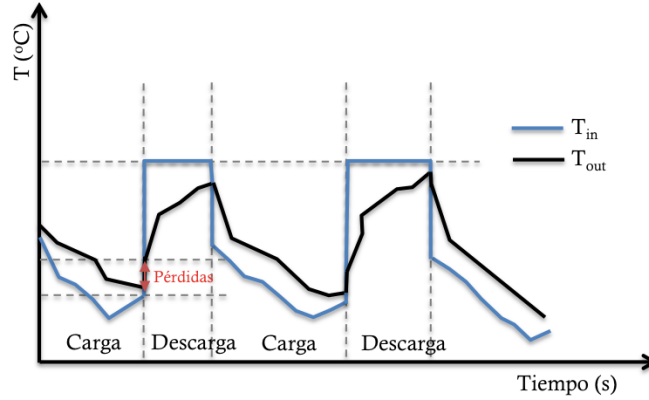


Figura 4.52: Gráfico esquemático de fachada como intercambiador regenerativo

estudio del sistema como intercambiador regenerativo. No obstante para que el rendimiento tome valores más acordes con los que se esperan en relación a un correcto funcionamiento es preciso redefinirlo de forma que éstos estén comprendidos entre 0 y 1.

Para evaluar el rendimiento del sistema con PCM como intercambiador regenerativo se puede realizar en función de la temperatura de entrada y salida del aire en la carga y descarga y de fusión del PCM mediante las expresiones 4.137 y 4.138. Ambas expresiones son idénticas y tomarán valores positivos.

$$\eta_{carga} = \frac{T_{out}(carga) - T_{in}(carga)}{T_{PCM} - T_{in}(carga)} \quad (4.137)$$

$$\eta_{descarga} = \frac{T_{out}(descarga) - T_{in}(descarga)}{T_{PCM} - T_{in}(descarga)} \quad (4.138)$$

Por existir pérdidas el valor del rendimiento en carga será más estable que en descarga y se podrá aproximar a un valor teórico.

El rendimiento será variable a lo largo del tiempo ya que las temperaturas de entrada y salida no tienen por qué ser constantes, y de un período a otro ya que los tiempos de carga y descarga no están fijados previamente por depender del clima. Además el calor específico no es constante debido al cambio de fase. No obstante se pueden obtener valores medios por lo que

puede ser muy útil de cara al diseño.

Las ecuaciones 4.130 para la corriente fluida y 4.131 para el sólido matriz en caso de un intercambiador regenerativo con cambio de fase se reescriben como:

$$h_c \cdot A(t) \cdot (T_{PCM} - T_{fluido}) = \dot{m}_f \cdot C_f \cdot L \cdot \frac{\partial T_{fluido}}{\partial x} + m_f \cdot C_f \cdot \frac{\partial T_{fluido}}{\partial t} \quad (4.139)$$

$$h_c \cdot A(t) \cdot (T_{PCM} - T_{fluido}) = Q(t) = \lambda \cdot \frac{dM}{dt} \quad (4.140)$$

El objetivo del método simplificado nivel 2 es encontrar una solución numérica que permita aproximar el valor del rendimiento del intercambiador  $\eta$ , en función de unos parámetros adimensionales  $\Lambda$  y  $\Pi$  que sean análogos a los descritos.

Si se considera constante la temperatura del sólido matriz durante el cambio de fase, para cada instante de tiempo se cumplirá:

$$\frac{h_c \cdot A(t)}{\dot{m}_f \cdot C_f \cdot L} (T_{PCM} - T_{fluido}) = \frac{dT_{fluido}(t)}{dx} \quad (4.141)$$

Integrando la ecuación anterior en x, de 0 a L se obtiene:

$$-\frac{h_c \cdot A(t)}{\dot{m}_f \cdot C_f} = \ln(T_{PCM} - T_{out}(t)) - \ln(T_{PCM} - T_{in}(t)) \quad (4.142)$$

Operando en la ecuación 4.142 queda:

$$\frac{T_{out}(t) - T_{in}(t)}{T_{PCM} - T_{in}(t)} = 1 - e^{-\frac{h_c \cdot A(t)}{\dot{m}_f \cdot C_f}} \quad (4.143)$$

O de forma equivalente:

$$T_{out}(t) - T_{in}(t) = [T_{PCM} - T_{in}(t)] \left( 1 - e^{-\frac{h_c \cdot A(t)}{\dot{m}_f \cdot C_f}} \right) \quad (4.144)$$

Por otra parte suponiendo que todo el calor transferido se emplea en cambiar de fase el PCM, se puede afirmar que la cantidad de PCM que cambia de fase en un instante de tiempo vendrá dada por el calor que es cedido al aire, es decir:

$$Q(t) = \lambda \cdot \frac{dM}{dt} = \dot{m}_f \cdot C_f \cdot (T_{out}(t) - T_{in}(t)) \quad (4.145)$$

Sustituyendo en 4.144, resulta:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\dot{m}_f \cdot C_f (T_{PCM} - T_{in}(t))}{\lambda} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{h_c \cdot A(t)}{\dot{m}_f \cdot C_f}} \right) \quad (4.146)$$

Siendo  $M$  la cantidad total de PCM. Véase que la ecuación 4.146 se obtiene en función del parámetro  $\Lambda$  definido en 4.132.

Por último para hacer posible la solución, es necesario definir el modo mediante el cual se produce la transferencia térmica. Podrían considerarse dos hipótesis simplificadoras del mecanismo de la congelación, ya sea considerando que ésta es creciente hacia el interior del elemento, por lo que variaría el coeficiente de transferencia con el tiempo, o bien que el área congelada es creciente. En la figura 4.53 se representan ambos esquemas.

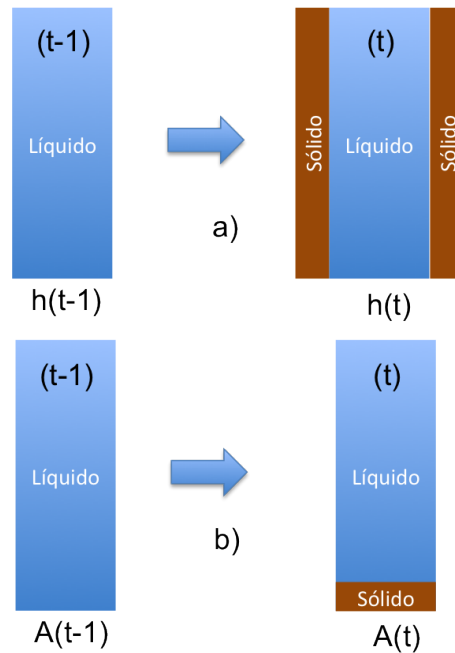


Figura 4.53: Gráfico esquemático de modos de congelación en láminas de PCM

En el primero de ellos a) el coeficiente  $h(t)$  se podría estimar añadiendo la resistencia adicional (serie) que se produce por estar interpuesto el elemento congelado. El segundo b) consideraría que el área es variable como se determina a continuación. Dado el limitado espesor de la lámina se considera

adecuado este segundo mecanismo.

Considerando como área efectiva aquella en la que se produce transferencia de calor, es decir la que está sometida al cambio de fase en cada instante de tiempo, se puede escribir:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{A_0}{M_0} \cdot \frac{dM}{dt} \quad (4.147)$$

Que discretizada resulta:

$$A(t) = A(t-1) - \frac{A_0}{M_0} \cdot \frac{dM}{dt} \cdot \Delta t \quad (4.148)$$

El rendimiento del intercambiador regenerativo en la carga vendrá dado por la ecuación 4.149, análoga a la 4.137

$$\eta = \frac{\int_{\tau} (T_{out}(t) - T_{in}(t)) dt}{\int_{\tau} (T_{PCM} - T_{in}(t)) dt} \quad (4.149)$$

Siendo  $\tau$  el período de carga considerado.

El término  $\Pi$  puede obtenerse igualmente. En efecto, si se expresa el calor transferido en función del tiempo como:

$$h_c \cdot A(t) \cdot (T_{PCM} - T_{in}) = Q(t) = \lambda \cdot \frac{dM}{dt} \quad (4.150)$$

O lo que es lo mismo:

$$h_c \cdot A(t) \cdot (T_{PCM} - T_{in}) \cdot dt = \frac{M_0}{A_0} \cdot \lambda \cdot dA \quad (4.151)$$

Integrando la ecuación anterior se obtiene:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{h_c \cdot A_0 \cdot (T_{PCM} - T_{in})}{M_0 \cdot \lambda} \cdot t} \quad (4.152)$$

Así los parámetros adimensionales  $\Lambda$  y  $\Pi$  definidos en 4.132 y 4.133 para un intercambiador regenerativo pueden tomar la forma 4.153 y 4.154.

$$\Lambda = \frac{h_c \cdot A}{\dot{m}_f \cdot C_f} \quad (4.153)$$

$$\Pi = \frac{h_c \cdot A \cdot \tau}{m_m \cdot \frac{\lambda}{T_{PCM} - T_{in}}} \quad (4.154)$$

En el caso de  $\Pi$ , la similitud entre las ecuaciones es clara ya que el término  $L/v$  es despreciable por ser muy inferior a  $P$ . Es decir, la permanencia del fluido en la fachada es insignificante frente al periodo de carga o descarga. A la duración del periodo de carga o descarga se le denominará  $\tau$ . Por otra parte el término  $C_m$  no es constante con la temperatura. Dado el peso del cambio de fase frente a la inercia se sustituye éste por el cociente entre el calor latente de cambio de fase y la diferencia de temperatura con respecto a la de fusión.

Por todo lo anterior se puede afirmar que las ecuaciones 4.144, 4.146 y 4.148, permiten establecer un comportamiento teórico del intercambiador como se ha dicho en función de los parámetros adimensionales del tipo  $\Lambda$  y  $\Pi$ .

En la figura 4.54 se incluye el cálculo del rendimiento en función de  $\Lambda$  para valores de  $\Pi$  comprendidos entre 0 y 50.

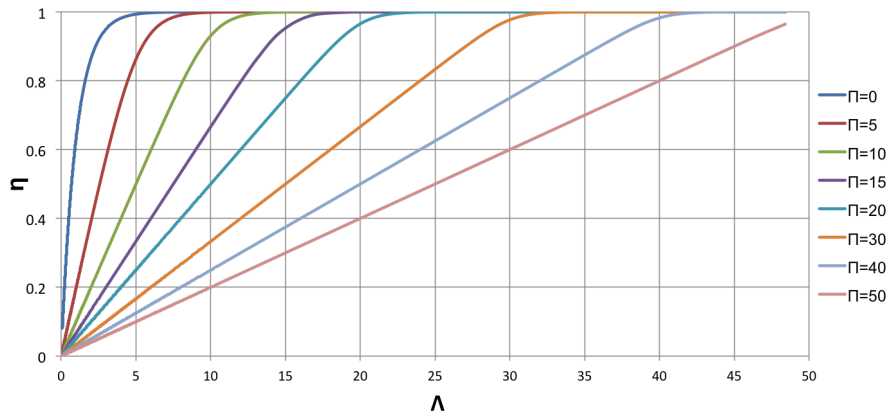


Figura 4.54: Rendimiento teórico de intercambiador regenerativo para valores de  $\Pi$  comprendidos entre 0 y 50

Si superponemos los rendimientos expresados en la figura anterior con los clásicos de la literatura existente, véase por ejemplo (Hewitt y otros, 1994), se observa el comportamiento diferenciado de lo obtenido.

Sin embargo los valores habituales para las fachadas como intercambiadores regenerativos proporcionan valores de  $\Pi$  más pequeños. En la figura 4.56, se incluye el resultado para  $\Pi$  comprendidos entre 0 y 5.

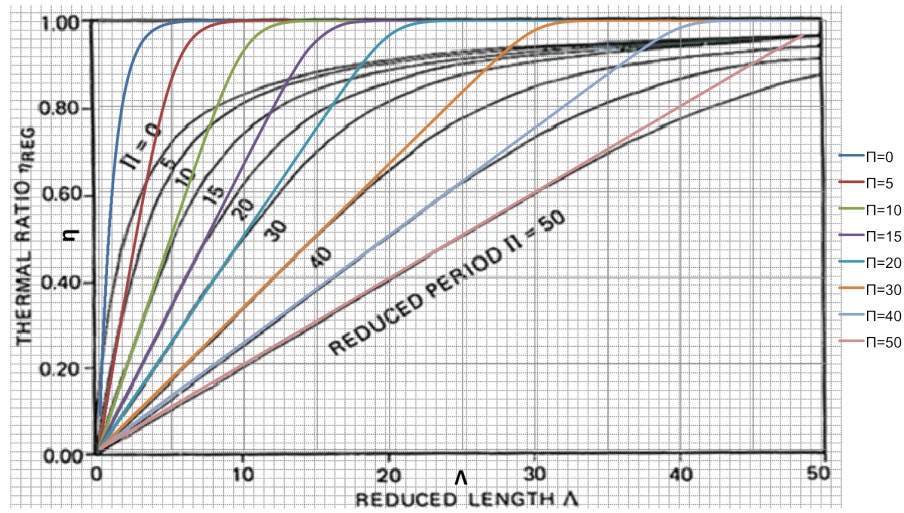


Figura 4.55: Rendimiento teórico de intercambiador regenerativo para valores de  $\Pi$  comprendidos entre 0 y 50. Comparación

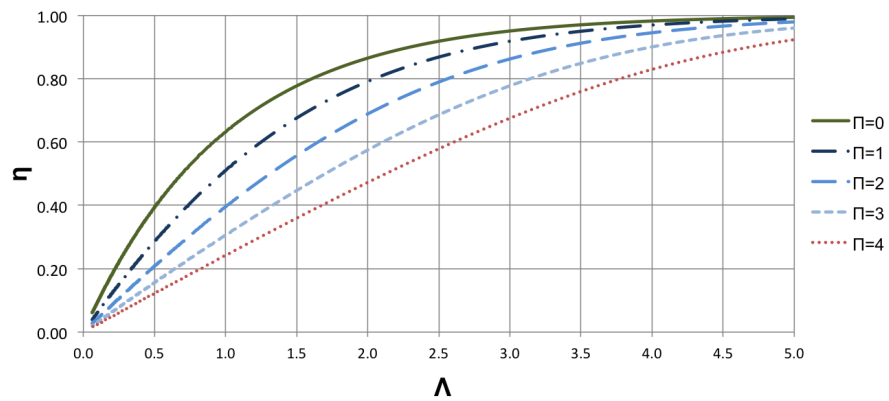


Figura 4.56: Rendimiento teórico de intercambiador regenerativo para valores de  $\Pi$  comprendidos entre 0 y 5



Para conocer el comportamiento del sistema se hace preciso establecer un conjunto de indicadores que informen de ratios sobre energía cargada y descargada en relación con la máxima posible. La energía máxima a cargar o descargar dependerá de la configuración y del clima así como del modo de operación. En el capítulo 5 se realiza una propuesta de indicadores.



## Capítulo 5

# Indicadores de evaluación de la eficiencia

### 5.1. Definición de indicadores

Para evaluar el comportamiento de los sistemas de almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase es preciso definir una serie de indicadores que proporcionen información de la eficiencia del sistema.

La propuesta tiene como finalidad definir un conjunto de indicadores objetivos que sean cuantificables desde el modelo. Se busca que los indicadores tengan sentido físico. El conjunto de indicadores tomará en general valores entre cero y uno, siendo crecientes según la lógica del fenómeno que traten.

La evaluación desde el modelo nivel 1 calibrado permite establecer correlaciones comprobables desde la física y acordes con el modelo experimental de forma más rápida sin los inconvenientes de modelos detallados debido a la rapidez del cálculo. El análisis de las tendencias de las variables permite predecir el comportamiento del sistema posibilitando la toma de decisiones de manera acertada. El establecimiento de indicadores y su valoración a través del modelo calibrado da paso al desarrollo de modelos simplificados nivel 2.

Los valores propuestos son agregados para el espacio de tiempo al que se refiere el indicador, ya sea un día, mes o incluso un año.

### 5.1.1. Indicadores de Eficiencia Global

#### 5.1.1.1. Eficiencia Global del sistema acoplado al Edificio

La eficiencia global a nivel de edificio debe ser un indicador que muestre el comportamiento del sistema acoplado al edificio, es decir la variación energética en términos de consumo o demanda del edificio al incorporar el PCM en el sistema entre la energía necesaria a aportar para que el sistema funcione.

Se define Eficiencia Global del sistema de Fachada acoplado al Edificio  $\varepsilon_{GFE}$  a la razón entre la energía ahorrada por el edificio a consecuencia de incorporar el sistema de fachada con PCM y la energía necesaria suministrada para alcanzarlo. La Eficiencia Global del sistema de Fachada acoplado al Edificio se analizará en términos de demanda para ser independiente de las instalaciones del edificio.

$$\varepsilon_{GFE} = \frac{\Delta D}{C'_{vent}} \quad (5.1)$$

Siendo:

$\Delta D$  la diferencia de demanda con y sin PCM del modelo acoplado, es decir la demanda del edificio incorporando la fachada con PCM menos la demanda del mismo edificio sin incorporar ésta.

$C'_{vent}$  el consumo de ventiladores del modelo acoplado.

Este indicador es un indicador tipo COP que tomará valores superiores a la unidad al hacer uso de energía renovable.

La evaluación de este indicador requiere disponer de un método de evaluación global de la demanda energética del edificio que sea capaz de evaluar el edificio con y sin PCM.

#### 5.1.1.2. Eficiencia Global del sistema de Fachada

El comportamiento de una fachada con PCM depende fundamentalmente de las condiciones térmicas (clima y orientación) y las necesidades del edificio en función de su uso.

Sin embargo puede analizarse el comportamiento de las distintas soluciones de fachada sin tener en cuenta el modelo completo del edificio. El sistema

de fachada se aborda así como una máquina térmica que actúa bajo un conjunto de condiciones de contorno establecidas.

Se define Eficiencia Global del sistema de Fachada  $\varepsilon_{GF}$  a la relación entre la variación energética que supone la incorporación del sistema con PCM a una fachada y la energía necesaria suministrada para alcanzarlo. Es un indicador desacoplado con el edificio por lo que no se puede hablar de energía ahorrada. La energía será la suma de la energía extraída del edificio más la diferencia energética que supone la incorporación de la cámara con PCM más el elemento exterior.

Es decir, la variación energética vendrá dada por el aprovechamiento del sistema de ventilación como máquina térmica unida al efecto de incorporar la cámara de aire. El funcionamiento del sistema será bajo unas condiciones de contorno establecidas de temperaturas, periodos de funcionamiento, etc.

La evaluación de este indicador requiere disponer de un modelo que puede ser simplificado nivel 1 tal y como el desarrollado. El indicador y su validez dependerá de las hipótesis y simplificaciones del modelo.

$$\varepsilon_{GF} = \frac{E_V + E_C}{C_{vent}} \quad (5.2)$$

Siendo:

$E_V$  La energía obtenida por el efecto ventilación  
 $E_C$  La energía relacionada con el efecto cámara  
 $C_{vent}$  El consumo de ventiladores

Este indicador depende exclusivamente del modelo e igualmente es tipo COP tomando valores superiores a la unidad al hacer uso de energía renovable.

En la figura 5.1 se muestra un esquema de la demanda de refrigeración para un edificio sin sistema PCM, con sistema PCM (acoplado) y para el modelo sin acoplamiento. Gráficamente se puede ver el significado de los indicadores de Eficiencia Global del sistema acoplado al Edificio y de la Eficiencia Global del sistema de Fachada (sin acoplar), la relación entre ambos será el factor de acoplamiento que se define en el apartado siguiente.

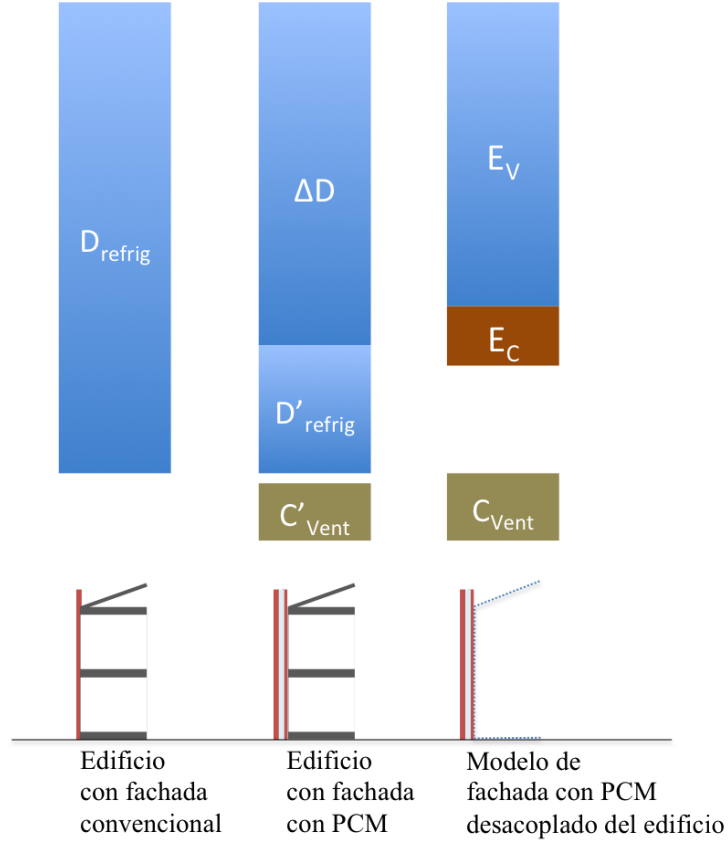


Figura 5.1: Gráfico esquemático de energías

#### 5.1.1.3. Factor de acoplamiento

Si se divide la ecuación 5.1 entre la 5.2 se obtiene un nuevo indicador  $\chi$ , factor de acoplamiento.

El factor de acoplamiento mide la variación del comportamiento del sistema de fachada al tener en cuenta el resto de condiciones que supone el acoplamiento del sistema de fachada con el edificio:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{GFE}}{\varepsilon_{GF}} \quad (5.3)$$

Desarrollando la ecuación 5.3, se obtiene:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{GFE}}{\varepsilon_{GF}} = \frac{\frac{\Delta D}{C'_{vent}}}{\frac{E_v + E_c}{C_{vent}}} = \frac{\Delta D}{E_V + E_C} \cdot \frac{C_{vent}}{C'_{vent}} \quad (5.4)$$

El funcionamiento del sistema no será idéntico en los modelos anteriores y por tanto el consumo de los ventiladores no será el mismo.

### 5.1.2. Indicadores parciales

El efecto de la incorporación del sistema de fachada con PCM se analizará como se ha dicho anteriormente mediante la suma de dos efectos superpuestos más el comportamiento de los ventiladores.

La transferencia de energía al edificio principalmente vendrá dada por la incorporación de aire frío en el edificio procedente de la cámara durante el día (descarga). Sin embargo no se desprecia el posible ahorro que supone la cámara en cuanto a que es un elemento superpuesto de la envolvente térmica que cambia las condiciones de contorno del edificio.

El objetivo es referenciar estos valores contra valores de diseño interponiendo un conjunto de indicadores. Volviendo a la ecuación 5.2, ésta se puede expresar como:

$$\varepsilon_{GF} = \frac{1}{C_{vent}} \cdot (E_V + E_C) \quad (5.5)$$

#### 5.1.2.1. Factor de ventilación

A continuación se analizará el efecto debido a la ventilación de la cámara a través de un indicador parcial agregado, Factor de ventilación  $f_V$  que se compone de otros cuatro. El objetivo es poder analizar el comportamiento del efecto ventilación a través de parámetros adimensionales.

La energía proporcionada por la fachada en relación con la ventilación se obtiene durante el proceso de descarga, es decir cuando el PCM absorbe calor del edificio refrigerándolo.

La energía de descarga ( $E_{Descarga}$ ) no podrá ser superior a la energía máxima disponible para ello ( $E_{máx.Descarga}$ ) para cada periodo. Esta energía no podrá superar la energía disponible para ello que proviene de la suma de la

energía previamente cargada ( $E_{Carga}$ ) en distintos períodos.

Por otra parte la energía cargada ( $E_{Carga}$ ) en cada período no podrá superar la energía máxima disponible para cargar ( $E_{máx.Carga}$ ), y a su vez ésta no podrá ser superior a la energía máxima de carga que por razones de diseño sea posible cargar ( $E_{Diseño carga}$ ).

Es decir:

$$E_V = E_{Descarga} = \frac{E_{Descarga}}{E_{máx.Descarga}} \cdot \frac{E_{máx.Descarga}}{E_{Carga}} \cdot \frac{E_{Carga}}{E_{máx.Carga}} \cdot \frac{E_{máx.Carga}}{E_{Diseño carga}} \cdot E_{Diseño carga} \quad (5.6)$$

Llamando:

$$\begin{aligned} f_U, \text{ factor de utilización a } & \frac{E_{Descarga}}{E_{máx.Descarga}} \\ f_E, \text{ factor de equilibrio a } & \frac{E_{máx.Descarga}}{E_{Carga}} \\ f_{Cr}, \text{ factor de carga real } & \frac{E_{Carga}}{E_{máx.Carga}} \\ f_{Cd}, \text{ factor de carga de diseño } & \frac{E_{máx.Carga}}{E_{Diseño carga}} \end{aligned}$$

La expresión 5.6 se puede poner en la forma:

$$E_V = E_{Descarga} = f_U \cdot f_E \cdot f_{Cr} \cdot f_{Cd} \cdot E_{Diseño carga} = f_V \cdot E_{Diseño carga} \quad (5.7)$$

Siendo  $f_V$  el factor de ventilación

Esquemáticamente el proceso de la carga se puede ver en la figura 5.2, el de la cámara parada en la figura 5.3 y el de la descarga en la figura 5.4. La energía se expresa referida a  $m^2$  de superficie de fachada.

Nótese que el factor de equilibrio  $f_E$  tal y como se ha definido puede ser mayor de uno.

#### 5.1.2.2. Factor del efecto cámara

La fachada ventilada además de la ventilación tiene el efecto de ser una segunda piel del edificio. Este hecho supone una estabilización térmica importante debida a la alta inercia térmica. Lo dicho anteriormente se refiere a refrigeración pero la estabilización térmica no solo ocurre en condiciones de



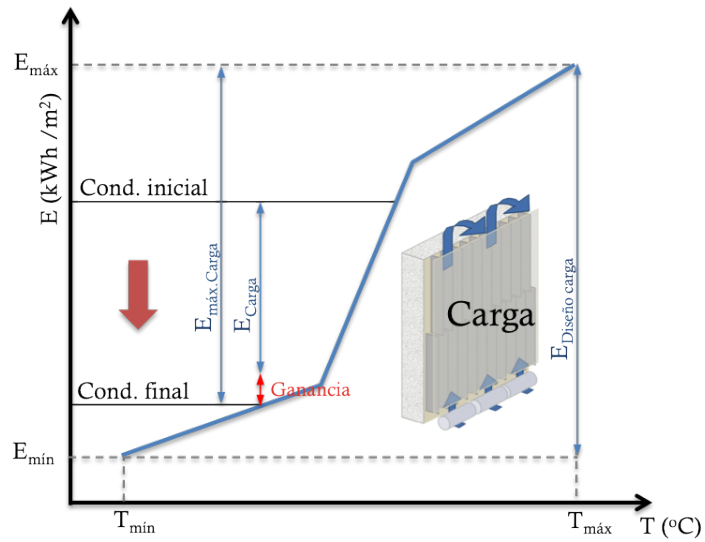


Figura 5.2: Gráfico esquemático de energía en el proceso de carga

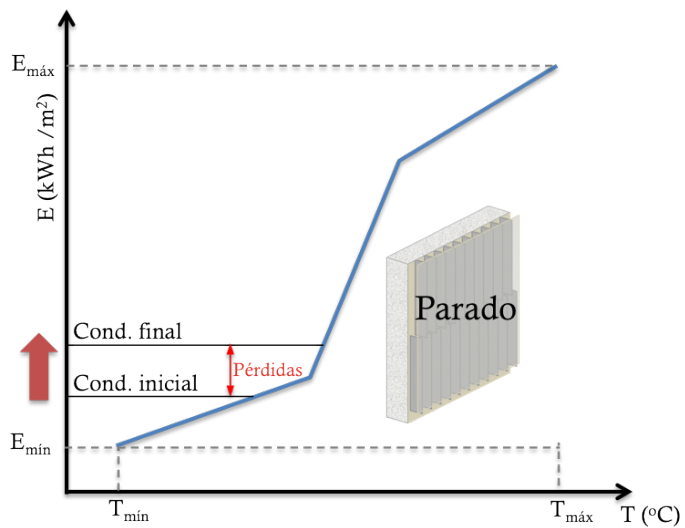


Figura 5.3: Gráfico esquemático de energía en el proceso de cámara parada

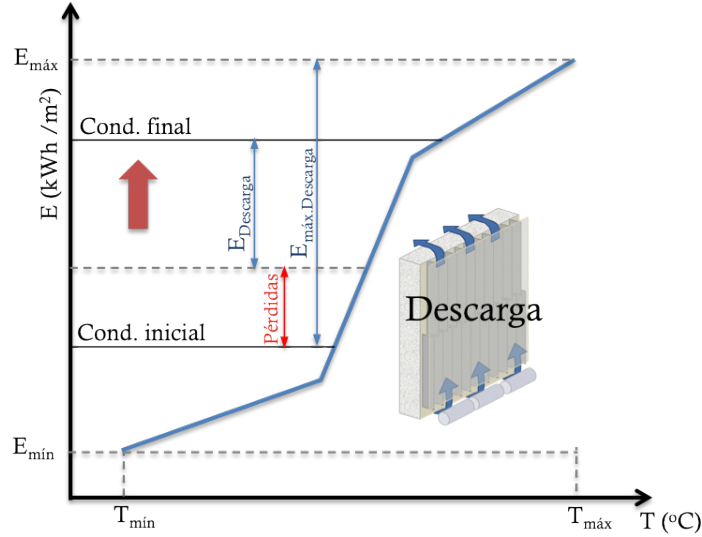


Figura 5.4: Gráfico esquemático de energía en el proceso de descarga

verano sino también en invierno. No obstante el efecto de la ventilación es muy superior al del efecto cámara.

El efecto cámara trae consigo una variación en la transmisión térmica del muro más un cambio en las condiciones de excitación solar. Además al ser regulable la ventilación de la cámara, las condiciones térmicas del aire en el interior de la cámara variarán en función de los criterios de funcionamiento establecidos. El cambio en la excitación solar afecta a la ganancia de calor a través de los cerramientos. La idea no es pensar que la ganancia solar se ha perdido, sino que, al considerar que el muro interior ve al exterior a través de la cámara, la excitación solar está presente a través de ésta. Los flujos de calor tienen distinto signo en invierno y verano, como se trata de un ahorro los valores referidos al verano deben cambiarse de signo para poder sumarse a los de invierno.

Volviendo a la ecuación 5.5, y sustituyendo 5.7 tenemos

$$\varepsilon_{GF} = \frac{1}{C_{vent}} \cdot (E_V + E_C) = \frac{1}{C_{vent}} \cdot (f_V \cdot E_{Diseño\ carga} + E_C) \quad (5.8)$$

Multiplicando y dividiendo la ecuación anterior por  $E_{Diseño\ carga}$ , se obtiene:

$$\varepsilon_{GF} = \frac{E_{Diseño\ carga}}{C_{vent}} \cdot \left( f_V + \frac{E_C}{E_{Diseño\ carga}} \right) \quad (5.9)$$

Definiendo el factor del efecto cámara como:

$$f_C = \frac{E_C}{E_{Diseño\ carga}} \quad (5.10)$$

La ecuación toma la forma:

$$\varepsilon_{GF} = \frac{E_{Diseño\ carga}}{C_{vent}} \cdot (f_V + f_C) \quad (5.11)$$

La energía relacionada con el efecto cámara  $E_C$  se calculará mediante la diferencia de los flujos de dos modelos superpuestos, el primero con la fachada con PCM y el segundo con una fachada sin cámara ni elemento exterior. El segundo modelo estará sometido a las mismas excitaciones que el elemento exterior del primero.

### 5.1.2.3. Factor de instalación

Se define factor de instalación  $f_I$  a la relación entre el consumo de los ventiladores obtenido y el consumo de los mismos suponiendo funcionaran continuamente durante el tiempo de funcionamiento activo definido en las condiciones de diseño y operación de la cámara.

$$f_I = \frac{C_{vent}}{C_{Diseño.vent}} \quad (5.12)$$

El factor de instalación proporciona información del número de horas de funcionamiento real frente al máximo número de horas totales del año en los que el sistema permanecería activo por condiciones de diseño. El factor de instalación previsiblemente será inferior a la unidad, ya que el tiempo de funcionamiento de diseño en general debe ser mayor que el real, control horario con condiciones adicionales, es decir condiciones de diseño más de temperatura. Sin embargo si se produjeran sobrecalentamientos continuos en la cámara en condiciones de verano el indicador podría ser superior a la unidad.

#### 5.1.2.4. Factor de diseño

**Factor de diseño:**  $f_D$

Definimos factor de diseño como:

$$f_D = \frac{E_{Diseño\ carga}}{C_{Diseño.vent}} \quad (5.13)$$

El factor  $f_D$  proporciona un índice que depende exclusivamente del diseño del sistema e indica la relación entre la energía teórica renovable que se puede obtener del sistema frente al consumo teórico.

#### 5.1.3. Relación entre indicadores

Con estos factores definidos y calculables, la eficiencia global  $\varepsilon_{GF}$  puede determinarse como:

$$\varepsilon_{GF} = f_D \cdot \frac{f_V + f_C}{f_I} \quad (5.14)$$

La Eficiencia Global del sistema de la Fachada acoplado al Edificio  $\varepsilon_{GFE}$ , quedaría dada por:

$$\varepsilon_{GFE} = \chi \cdot \varepsilon \cdot \delta \cdot \eta \quad (5.15)$$

$\chi$  depende fundamentalmente del edificio y se ha definido como factor de acoplamiento

$\varepsilon$  depende del diseño y se ha definido como factor de diseño  $f_D$

$\delta$  depende fundamentalmente del clima (en relación con el diseño y operación) y viene dado por  $f_V + f_C$

$f_V$  está compuesto a su vez por cuatro indicadores:  $f_V = f_U \cdot f_E \cdot f_{Cr} \cdot f_{Cd}$

$f_C$  factor del efecto cámara que tiene en cuenta lo que supone la cámara como barrera térmica

$\eta$  depende del uso de ventiladores y es el inverso de  $f_I$

## 5.2. Cálculo de indicadores

### 5.2.1. Indicadores de Eficiencia Global

El cálculo de la eficiencia global a nivel de edificio precisa para su obtención de un método de evaluación de la demanda energética del edificio tipo LIDER, Design Builder, Energy Plus, Transys o Ecotect. Para el cálculo es necesario poder modelar la fachada con PCM integrada en el edificio.

En el caso de usar los programas oficiales (LIDER-CALENER) sería necesario recurrir a las llamadas capacidades adicionales. Las capacidades adicionales son un recurso añadido a los programas para poder modelar tecnologías nuevas que no forman parte del conjunto de elementos susceptible de ser modelado por los procedimientos habituales. La aplicación de estas capacidades se hace a través del principio de equivalencia, que consiste en sustituir el modelo por un modelo equivalente cuyas solicitaciones hacia el edificio sean las que proporciona el elemento innovador.

En el momento actual no está integrado este tipo de elementos en los programas por lo que aunque el modelo pudiera caracterizar el efecto de la cámara no tendría en cuenta el efecto de la ventilación.

El planteamiento para calcular el incremento en la demanda sería realizar un doble cálculo, con y sin el sistema propuesto. Para el cálculo de la fachada acoplada al edificio se sustituiría en el modelo global del edificio la fachada tradicional compuesta por el muro interior por un elemento equivalente con la temperatura superficial que se obtiene del modelo simplificado. Además se debe incluir como aporte el obtenido por la ventilación en descarga.

Se trata de un proceso iterativo. El modelo simplificado se alimenta sucesivamente con las temperaturas interiores obtenidas en el cálculo del edificio hasta que se produzca la convergencia. El dato del consumo de los ventiladores  $C'_{vent}$  se obtiene del modelo simplificado en la última iteración.

El resultado de  $\varepsilon_{GFE}$  obtenido sería teórico referido a condiciones reglamentarias. Los valores obtenidos de demanda en general pueden ser superiores a los valores reales, por el efecto del usuario. En cualquier caso el acoplamiento con el edificio sería necesario para obtener los valores de demanda y consumo necesarios para la justificación a nivel de proyecto.

La obtención de la Eficiencia Global del sistema de Fachada  $\varepsilon_{GF}$  se rea-

liza exclusivamente con el modelo simplificado. Para su cálculo es necesario evaluar los indicadores parciales definidos.

### 5.2.2. Indicadores parciales

Para calcular los indicadores se necesita conocer el estado energético de la fachada para cada periodo de carga y descarga. Como se ha dicho anteriormente la fachada se podría considerar como un acumulador regenerativo estático (la carga y la descarga se producen en distintos momentos) que podría estar balanceado o no en función de las condiciones de funcionamiento. Por ello carece de sentido calcular eficiencias por debajo de un periodo mínimo de tiempo, al menos entre dos cargas o dos descargas. Por el mismo motivo cuanto mayor sea el número de ciclos mejor será la información proporcionada por cada indicador.

Las energías definidas se calculan para el proceso de la carga según se representa en la figura 5.2 y el de la descarga en la figura 5.4. La energía se expresará referida a  $m^2$  de superficie de fachada.

El valor de  $E_{Carga}$  y  $E_{Descarga}$  se obtiene a través de las expresiones 5.16 y 5.17 con las limitaciones de la temperatura del aire expuestas en el apartado 4.3.1.3. El cálculo se realiza por separado para las tres secciones en las que se divide la cámara y se representa por  $m^2$  de fachada.

$$E_{Carga} = \int_{Carga} \dot{m}_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot (T_{out} - T_{in}) dt \quad (5.16)$$

$$E_{Descarga} = \int_{Descarga} \dot{m}_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot (T_{out} - T_{in}) dt \quad (5.17)$$

Para calcular  $E_{máx.Carga}$  y  $E_{máx.Descarga}$  debe definirse la temperatura máxima de funcionamiento de la fachada. La energía máxima de la fachada se relaciona con el estado energético final de la fachada en el proceso de carga y con el inicial en el proceso de descarga, es decir la  $E_{máx.Carga}$  indica la energía máxima que la fachada podría haber cargado en el caso de que hubiera estado descargada por completo y la  $E_{máx.Descarga}$  indica la máxima energía que podría haber descargado en el caso de que se hubiera descargado por completo incluidas las pérdidas.

Para el cálculo de estas variables se calcula el estado energético de la fachada para cualquier temperatura. La  $E_{máx.Carga}$  se obtiene como diferencia de la  $E_{máx.Fachada}$  y la energía de la fachada en el momento en el que

finalizó la carga. La  $E_{máx.Descarga}$  se obtiene igualmente por diferencia entre  $E_{máx.Fachada}$  y la energía de la fachada en el momento en el que se inició la descarga.

En cada sección la energía total que es capaz de acumular la fachada es igual a la entalpía propia del material de cambio de fase a la que se debe añadir el efecto de la inercia de los muros exterior e interior. En el caso de fachadas ligeras prácticamente coincidirá con la del material PCM no siendo así para el caso de fachadas pesadas. Aun para fachadas pesadas el material de cambio de fase aporta mucha más energía proporcionalmente con respecto a de la inercia.

Como ejemplo ilustrativo, en la figura 5.5 se muestra la energía acumulada por el PCM en función de la temperatura y la energía de dos fachadas, una ligera formada por dos paneles de 4 cm de espesor como elemento interior y exterior y una pesada formada por un panel exterior de 4 cm y un muro interior de fábrica de 29 cm. La fachada pesada es la ensayada y usada en la calibración del modelo.

La energía acumulada en la fachada corresponderá con la expresión 5.5, teniendo en cuenta que por debajo del punto de fusión el PCM estará en estado sólido y no existirá el término  $m_{PCM} \cdot \lambda$ . La masa indicada es la de todos los elementos y la temperatura debe ser la de cada uno de ellos así como su calor específico.

$$E_{fachada} = m_{PCM} \cdot \lambda + \int m \cdot Cp \cdot (T - 273) dT \quad (5.18)$$

Por tanto,  $E_{máx.Carga}$  y  $E_{máx.Descarga}$  se obtiene de las siguientes expresiones 5.19 y 5.20

$$E_{máx.Carga} = E_{máx.Fachada} - E_{fachada-final de carga} \quad (5.19)$$

$$E_{máx.Descarga} = E_{máx.Fachada} - E_{fachada-inicio de descarga} \quad (5.20)$$

Igualmente  $E_{Diseño carga}$  se obtiene como diferencia entre la energía de la fachada en sus intervalos máximo y mínimo de operación (en cada ciclo), según la expresión 5.21. La masa análogamente es la de todos los elementos incluido el PCM así como su calor específico.

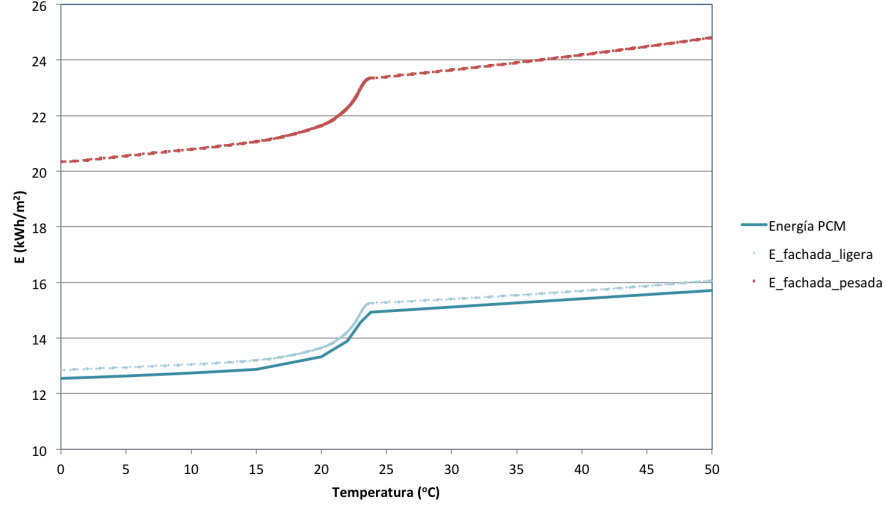


Figura 5.5: Gráfico ilustrativo de energía en función de la temperatura del PCM para fachada ligera y pesada

$$E_{Diseño\ carga} = m_{PCM} \cdot \lambda + \int m \cdot Cp \cdot (T_{máx} - T_{mín}) dT \quad (5.21)$$

Si el rango de temperaturas se excediese con respecto al previsto los indicadores tomarían valores superiores a la unidad.

Para ratificar lo dicho sobre la importancia del PCM frente a la inercia total nótese que en los ejemplos anteriores (figura 5.5) la energía de diseño de carga (en un ciclo), definido para valorar el gradiente energético entre los puntos máximo y mínimo de temperaturas de funcionamiento es de  $2,084\ kWh/m^2$  en la fachada ligera frente a  $2,356\ kWh/m^2$  en la fachada pesada.

La energía del efecto cámara se calcula para cada instante de tiempo mediante una fachada en paralelo de referencia idéntica a la del modelo a la que se elimina el elemento exterior y el PCM. La fachada está sometida a las mismas excitaciones que la que contiene el PCM. La energía relacionada con el efecto de la cámara  $E_C$  se obtiene como diferencia de la energía perdida o ganada en forma de flujo de calor acumulada en cada periodo. El flujo de calor considerado es el cedido o ganado por el muro interior en su parte interna.



Debe notarse que este efecto puede ser beneficioso o perjudicial. El efecto cámara en los meses de invierno será beneficioso siempre que la cámara mitigue las pérdidas energéticas (calor saliente), en verano será beneficioso reducir el calor entrante. Al tratarse de un ahorro el signo de la diferencia entre los valores debe ser por tanto coherente en invierno y verano. Se adopta como criterio el cambio de signo en verano dando valores positivos.

Por último el consumo de diseño de los ventiladores  $C_{Diseño.vent}$  se corresponde con el consumo establecido en el diseño con las horas de carga y descarga consideradas. Es un valor constante que se obtiene de multiplicar la potencia por el tiempo de funcionamiento previsto. Como simplificación se realiza el cálculo con la potencia nominal

El consumo de ventiladores  $C_{vent}$  se obtiene como la suma de los consumos acumulados en un periodo de tiempo determinado de los ventiladores en los procesos de carga, descarga y cuando se produzcan sobrecalentamientos. Se obtiene de multiplicar el número de horas por la potencia nominal. No se establecen criterios de funcionamiento con carga variable al exceder el alcance del modelo.

### 5.3. Dependencia formal y funcional

Como hipótesis de partida se estima que los indicadores responderán a las variables básicas siendo sensibles a su variación y haciendo uso de lo expuesto en el apartado anterior, la tendencia será más acusada para una combinación de variables dada siguiendo un esquema  $\Lambda$  II. descritos en el apartado 4.7.1

Para estudiar la dependencia de los indicadores debe tenerse en cuenta que las variables fundamentales que inciden en la eficiencia dependen de:

- El clima a través de la temperatura exterior y la insolación.
- La cantidad de PCM.
- El aislamiento e inercia de los elementos que componen la fachada.
- La velocidad del aire con la que se producirá la carga y descarga.

Se supone que la configuración geométrica de la fachada será fija así como el diseño de aletas o el tipo de PCM utilizado. No se considera la variación

de otras variables tales como los coeficientes de transmisión cuyo valor y dependencia de las demás variables fue ajustado en la calibración. Sin embargo los valores de los coeficientes de película deben ajustarse con respecto a la velocidad por su dependencia con esta.

En cualquier caso lo anteriormente expuesto no significa necesariamente perder generalidad ya que el efecto de la modificación de las variables de diseño no consideradas, será equivalente o estará relacionado con otras consideradas, por ejemplo una menor longitud del elemento será equivalente a un aumento de la velocidad. Con este análisis se pretende conocer la dependencia de los indicadores sin pretender estudiar el diseño óptimo del sistema.

### 5.3.1. Dependencia formal

En primer lugar se estudiará la dependencia formal de los indicadores. Los indicadores se calculan a través de las energías definidas cuya dependencia formal estará relacionada cualitativamente con las variables siguientes:

$E_{Carga}$ :

- las temperaturas mínimas y máximas diarias (cuanto mayores sean las temperaturas máximas mayor será la temperatura de las condiciones iniciales de la carga) y cuanto menores sean las temperaturas mínimas mayor será igualmente. Depende del potencial climático.;
- la cantidad de PCM almacenado y de la inercia, mayor cantidad supone mayor capacidad de almacenamiento;
- la velocidad de carga y descarga, a mayor velocidad de carga mayor carga y a mayor velocidad de descarga mayor carga posterior;
- e inversamente del aislamiento, cuanto menor aislamiento mayor descarga y por tanto mayor carga posterior.

$E_{Descarga}$ :

- las temperaturas máximas y mínimas diarias (cuanto menores sean las temperaturas mínimas menor será la temperatura de las condiciones iniciales de la descarga);
- la cantidad de PCM almacenado y de la inercia, mayor cantidad supone mayor capacidad de descarga;

- la velocidad de carga y descarga, a mayor velocidad de descarga mayor descarga y menores pérdidas, a mayor velocidad de carga mayor descarga posterior;
- del aislamiento, cuanto mayor aislamiento mayor descarga con menores pérdidas;

$E_{m\acute{a}x.Carga}$ :

- las temperaturas mínimas, cuanto menores sean las temperaturas mayor será la disponibilidad de carga;
- la cantidad de PCM almacenado y de la inercia, mayor cantidad supone mayor capacidad de carga;
- la velocidad de carga, a mayor velocidad mayor carga, independiente de la descarga;

$E_{m\acute{a}x.Descarga}$ :

- las temperaturas mínimas, cuanto menores sean las temperaturas mayor será la descarga por ser menores las temperaturas de inicio de descarga;
- la cantidad de PCM almacenado y de la inercia, mayor cantidad supone mayor capacidad de descarga;
- la velocidad de carga, a mayor velocidad mayor carga y por tanto mayor energía disponible para la descarga, al no depender de las condiciones finales es independiente de la velocidad de descarga;

$E_{Dise\tilde{n}o\ carga}$ , dependerá fundamentalmente de la cantidad de PCM almacenado y de la inercia.

La energía del efecto cámara,  $E_C$  será mayor cuanto más estable sea la fachada a lo largo de cada periodo en comparación con la temperatura exterior, es decir será más alta cuanto más extremas sean las temperaturas, mínimas y máximas al igual que cuanto mayor sea la cantidad de PCM, la velocidad de carga y el aislamiento exterior, que reduce las pérdidas. En condiciones de verano la fachada enfría el edificio, el aislamiento interior será contraproducente a este efecto.

Tabla 5.1: Dependencia de indicadores. Tendencia cualitativa

Energías	Temperaturas mínimas	Temperaturas máximas	Inercia y masa de PCM	Velocidad de carga	Velocidad de descarga	Aislamiento Exterior	Aislamiento Interior
$E_{Carga}$	+	+	+	+	+	-	-
$E_{Descarga}$	+	+	+	+	+	+	-
$E_{máx.Carga}$	+		+	+			
$E_{máx.Descarga}$	+		+	+		+	-
$E_{Diseño carga}$			+				
$E_{efecto Cámara}$	+	+	+	+		+	-

La tabla 5.1 recoge de manera agrupada el comportamiento indicado anteriormente:

Con las tendencias expresadas anteriormente el comportamiento de los indicadores será el que se recoge en la tabla 5.2. La dependencia expresada es la principal a la que el indicador es más sensible. La dependencia funcional se recoge en el apartado siguiente. Todo ello se refiere a utilización en refrigeración.

Tabla 5.2: Dependencia formal y significado de indicadores de eficiencia

Indicador	Nombre	Definición	Dependencia	Comportamiento
$f_V$	Factor de ventilación	$\frac{E_{Descarga}}{E_{Diseño carga}}$	Depende directamente del clima, las velocidades de carga y descarga y del aislamiento	Mide la respuesta de la fachada en cuanto a energía entregada para unas condiciones de diseño dadas

$f_U$	Factor de utilización	$\frac{E_{Descarga}}{E_{m\acute{a}x.Descarga}}$	Depende directamente de las temperaturas máximas y de la velocidad de descarga y del aislamiento	Mide la utilización de la energía en forma de ventilación frente a la energía disponible para descargar
$f_E$	Factor de equilibrio	$\frac{E_{m\acute{a}x.Descarga}}{E_{Carga}}$	Depende inversamente de las temperaturas máximas (mayores pérdidas) y de la velocidad de descarga y directamente del aislamiento exterior	Mide la relación entre la capacidad de descarga frente a la carga; fundamentalmente mide las pérdidas
$f_{Cr}$	Factor de carga real	$\frac{E_{Carga}}{E_{m\acute{a}x.Carga}}$	Depende directamente de las temperaturas máximas y mínimas, en mayor medida de las máximas, de la velocidad de descarga y del aislamiento	Mide la relación entre la carga real y la capacidad de carga disponible
$f_{Cd}$	Factor de carga de diseño	$\frac{E_{m\acute{a}x.Carga}}{E_{Dise\~{n}o\ carga}}$	Depende directamente de las temperaturas mínimas y de la velocidad de carga, e inversamente de la cantidad de PCM y ligeramente de la inercia	Mide la relación entre la carga disponible frente a la prevista en el diseño

$f_C$	Factor del efecto cámara	$\frac{E_C}{E_{Diseño\ carga}}$	Depende directamente de las temperaturas máximas y mínimas, del aislamiento exterior e inversamente del interior	Mide la estabilidad térmica de la cámara
$f_I$	Factor de instalación	$\frac{C_{vent}}{C_{Diseño.vent}}$	Depende directamente de las temperaturas máximas y mínimas de la inercia y PCM e inversamente del aislamiento	Mide el consumo real de ventiladores frente al de diseño
$f_D$	Factor de diseño	$\frac{E_{Diseño\ carga}}{C_{Diseño.vent}}$	Depende directamente de las condiciones de diseño exclusivamente	Mide el potencial renovable frente al consumo previsto en el diseño

Se debe añadir que de la dependencia formal descrita se deduce que a la hora de diseñar una solución los indicadores se refieren fundamentalmente a los siguientes aspectos:

- Factor de utilización  $f_U$ : Uso energético menos las pérdidas. Un  $f_U$  alto implica una buena descarga con pocas pérdidas;
- Factor de equilibrio  $f_E$ : Descarga frente a carga. Un  $f_E$  alto implica pocas pérdidas en periodos de parada;
- Factor de carga real  $f_{Cr}$ : Funcionamiento en la carga. Un  $f_{Cr}$  alto implica un buen comportamiento en la carga;
- Factor de carga de diseño  $f_{Cd}$ : Potencial de enfriamiento en relación con el clima. Un  $f_{Cd}$  alto implica un diseño adecuado para el clima considerado;

- Factor de instalación  $f_I$ : Operación. Un  $f_I$  alto implica que la fachada funciona según lo previsto;
- Factor de diseño  $f_D$ : Energía renovable. Un  $f_D$  alto implica un rango nominal de uso de energía renovable.
- Factor de ventilación  $f_V$ : Funcionamiento de la fachada como máquina térmica, cuanto mayor mejor será el comportamiento;
- Factor del efecto cámara  $f_C$ : Estabilidad térmica de la cámara. Un  $f_C$  alto implica una protección adicional del edificio, también bueno para condiciones de invierno. Un complemento al factor de ventilación.

### 5.3.2. Dependencia funcional

El estudio de la dependencia funcional trata de buscar la constatación de las tendencias expuestas en la dependencia formal. Las variables descritas en el apartado anterior tomarán valores razonables desde el punto de vista de un diseño real.

#### 5.3.2.1. Variables $\Lambda$ y $\Pi$

Para estudiar la dependencia funcional se hará uso de lo expuesto para intercambiadores regenerativos a través de las variables  $\Lambda$  y  $\Pi$ . Como se ha mencionado las diferencias con respecto a un intercambiador regenerativo ideal son sustanciales, no obstante se considera muy útil establecer relaciones con este tipo de elementos mediante el uso de los parámetros adimensionales.

Recordando las ecuaciones 4.132 y 4.133, se debe notar que para el caso de la fachada que nos ocupa:

- El área  $A$ , la longitud del intercambiador  $L$  y la masa  $m_m$  son fijas y constantes para un diseño dado;
- $\dot{m}_f$  depende de la velocidad del aire, así como  $h_c$ ;
- El Periodo  $P$  depende del clima, en carga y descarga;
- $C_f$  es constante pero  $C_m$  es variable al existir cambio de fase.

El objetivo que se persigue es analizar las fachadas desde el punto de vista de su eficiencia para poder agruparlas y en definitiva poder predecir su comportamiento. Es decir para un conjunto de variables básicas dadas

calcular las eficiencias parciales para obtener la eficiencia global y así poder analizar de qué y cómo depende ésta en función de las variables. Para esta agrupación y para el estudio de las tendencias es para lo que se considera válido el uso de los parámetros adimensionales.

Si se analiza de qué dependen los parámetros  $\Lambda$  y  $\Pi$  se observa que son sensibles a las siguientes variables:

- Al periodo de carga y descarga a través del parámetro  $P$ , y en definitiva al clima;
- a la configuración de la fachada en cuanto a la cantidad de PCM y la inercia de los paramentos, a través de  $m_m$ ;
- a la velocidad del aire que atraviesa la cámara durante la carga y descarga.

Sin embargo no son sensibles al nivel de aislamiento de los paramentos, variable que habrá que considerar por separado.

El estudio de la dependencia funcional se basará en realizar pasadas masivas del modelo de cálculo para un conjunto de fachadas de la misma tipología. Se realizará para un clima dado, el de Madrid. El periodo considerado de refrigeración comprenderá los meses de julio y agosto. Para extrapolarlo a otras situaciones, el cálculo se repetirá en el estudio de casos propuesto en el apartado 6.4.2.

En el cálculo se considera que los coeficientes de película son los obtenidos en la calibración, dependientes de la velocidad, es decir para velocidad de 2,0 (m/s)  $hc(1)=18 \text{ W/m}^2\text{K}$   $hc(2)=hc(3)=8 \text{ W/m}^2\text{K}$  y para velocidad= 3,5 (m/s)  $hc(1)=24 \text{ W/m}^2\text{K}$   $hc(2)=hc(3)=13 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Se considera el consumo de los ventiladores variable en función del caudal. La variación con la velocidad que se propone es lineal con respecto a la potencia nominal. Esta hipótesis, aunque pueda alejarse de la realidad se hace para poder abarcar un rango mayor de velocidades. La variación del consumo en función de la velocidad debería considerarse con el cubo de la potencia con respecto a la nominal, para un rango limitado de velocidades de funcionamiento, superado este rango habría que redimensionar el ventilador a uno más adecuado. Por ello se tomará lineal ya que en otro caso el peso de este factor respecto al resto de variables sería determinante en el cálculo



de eficiencias. Nótese la relativa escasa importancia de este factor en el conjunto de indicadores propuestos. Un completo estudio de casos de posibles ventiladores optimizado excede claramente el objeto de este apartado.

### 5.3.2.2. Fachada como intercambiador regenerativo

En el estudio de la fachada como intercambiador regenerativo se comprobará el funcionamiento en relación con el rendimiento del regenerador a través de los parámetros  $\Lambda$  y  $\Pi$  definidos en el apartado 4.7.1. La fachada a simular será la definida en el análisis de las variables del modelo, tabla 4.1. Para que el modelo sea lo más parecido a un intercambiador teórico se sustituirán en la fachada el elemento exterior e interior por paneles aislantes de 20 cm. de espesor. De esta forma al estar la fachada fuertemente aislada las pérdidas carecerán de importancia. El clima es el de Madrid.

#### Dependencia con la velocidad -

Se hace un conjunto de simulaciones variando la velocidad entre 0,5 m/s a 5,0 m/s. Se observa que el rendimiento del regenerador disminuye tanto en la carga como en la descarga al aumentar la velocidad del aire. En comportamiento del mismo sin embargo es más balanceado al aumentar ésta. El parámetro  $\Lambda$ , aunque lo parezca, no tiende a uno. Por definición puede tomar valores menores. Ver figura 5.6.

Representando gráficamente el resultado de los rendimientos obtenidos en la simulación en función de  $\Lambda$  se observa una inflexión en la carga por encima de una determinada velocidad (menores valores de  $\Lambda$ ) que se corresponde con el entorno de los 2 m/s. Esta inflexión debe producirse ya que para valores de velocidad infinita,  $\Lambda = 0$  y el rendimiento debe ser nulo, pero parece en principio más acusada de lo que le corresponde. Téngase en cuenta que el modelo de la fachada está calibrado para el rango de velocidad media del aire entre 2,0 y 3,5 m/s; por lo que operaría fuera de rango tanto a velocidades altas como bajas. Figura 5.7

Las afirmaciones anteriores sólo son válidas para el tipo de fachada considerado. Como se verá existe una relación entre la cantidad de PCM y la velocidad que afecta directamente al rendimiento.

Intuitivamente se puede ver que cuanto mayor sea la masa de PCM mayor tendrá que ser el caudal de aire que produzca su activación. Se podría

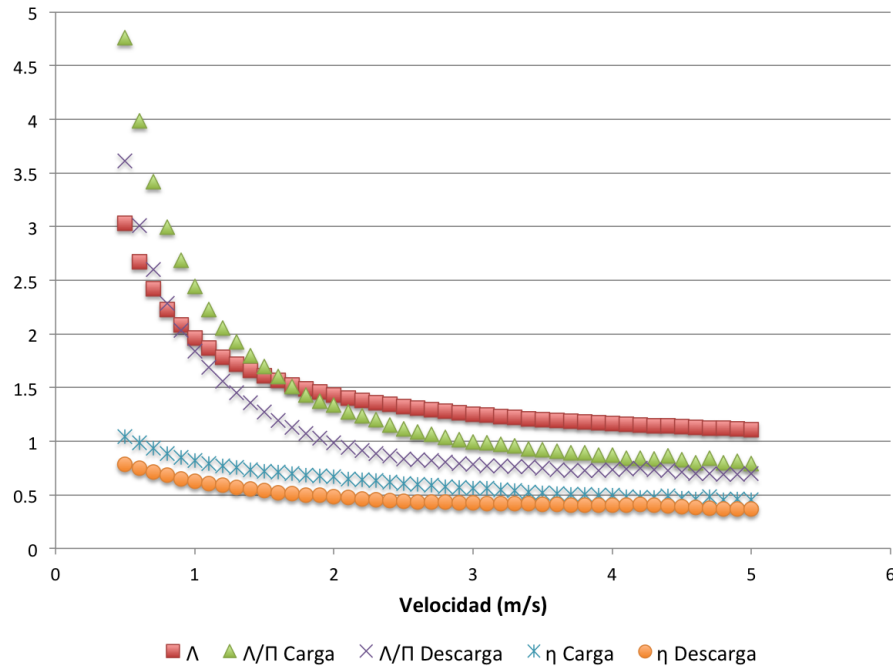


Figura 5.6: Valores de  $\Lambda$ ,  $\frac{\Lambda}{\Pi}$  y  $\eta$  en función de la velocidad

pensar que para mejorar el rendimiento es preciso aumentar la velocidad del aire a medida que la masa a activar sea mayor, lo que como se ha visto no es cierto y además un mayor caudal de aire implica un mayor consumo energético en ventiladores. Siempre se obtienen mejores eficiencias para velocidades bajas aunque lógicamente la energía que proporciona el sistema se reduce considerablemente.

### Dependencia con la cantidad de PCM -

La fachada anterior respondía a una tipología con una cantidad de PCM dada. Si se amplía el estudio variando la cantidad de PCM en el mismo rango de velocidades se comprueba que el comportamiento de la fachada como intercambiador en términos de  $\Lambda$  y  $\Pi$  es análogo.

El estudio de casos se corresponde con la variación de la cantidad de PCM de 10 a 100  $kg/m^2$  en intervalos de 20  $kg/m^2$ , siendo el primero de 10. Si se representa gráficamente el funcionamiento en función de  $\Lambda$ , se observa que los mejores rendimientos se obtienen con mayores cantidades de PCM, lo cual

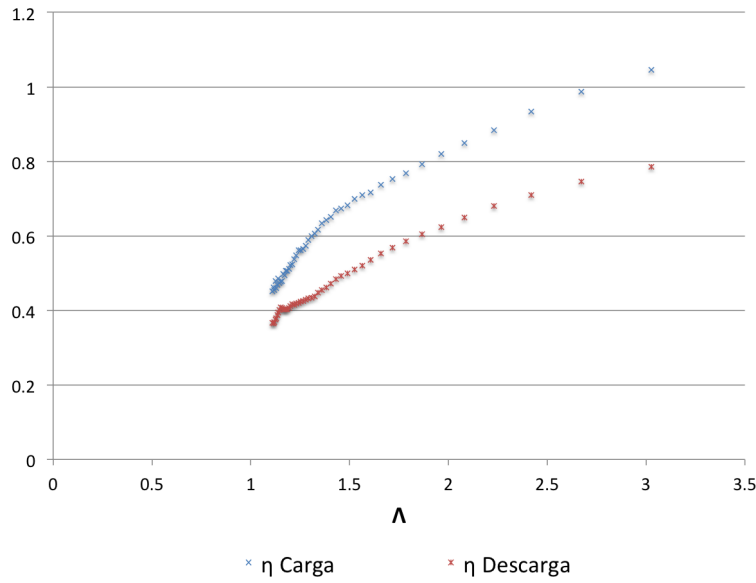


Figura 5.7: Rendimiento de fachada como intercambiador regenerativo

es lógico puesto que cuanto mayor sea la cantidad de material de cambio de fase existirá también una mayor superficie de transferencia y por tanto un mayor aprovechamiento. Figuras 5.8 y 5.9.

Para verificar el comportamiento de esta tipología en la variación de la cantidad de PCM y dar comienzo al estudio de la dependencia funcional de indicadores se comprueba cómo varía la Eficiencia Global de la fachada  $\varepsilon_{GF}$  en función de  $\Lambda$  y  $\Pi$ . Se constata que existe una relación directa entre ésta y  $\Lambda$  que sigue el mismo comportamiento para distintas cantidades de PCM. En el gráfico 5.10 se muestra esta relación, la línea de tendencia está muy marcada.

Aunque pudiera parecer que existe una dependencia funcional con una clara expresión matemática de ajuste esto no es así. Se trata de casos independientes y la tendencia se produce debido a la hipótesis de considerar el consumo de ventiladores de forma lineal.

Para no tomar falsas conclusiones se adjuntan las figuras 5.11 y 5.12 en las que se representa la misma gráfica, resultante de repetir el estudio de casos anterior haciendo variar el consumo de ventiladores con el cuadrado ( $C_{ventiladores} = (\frac{v}{v_{nom}})^2 \cdot C_{nom}$ ) y el cubo de su relación con la potencia nominal ( $C_{ventiladores} = (\frac{v}{v_{nom}})^3 \cdot C_{nom}$ ). Véase que para velocidades bajas el valor

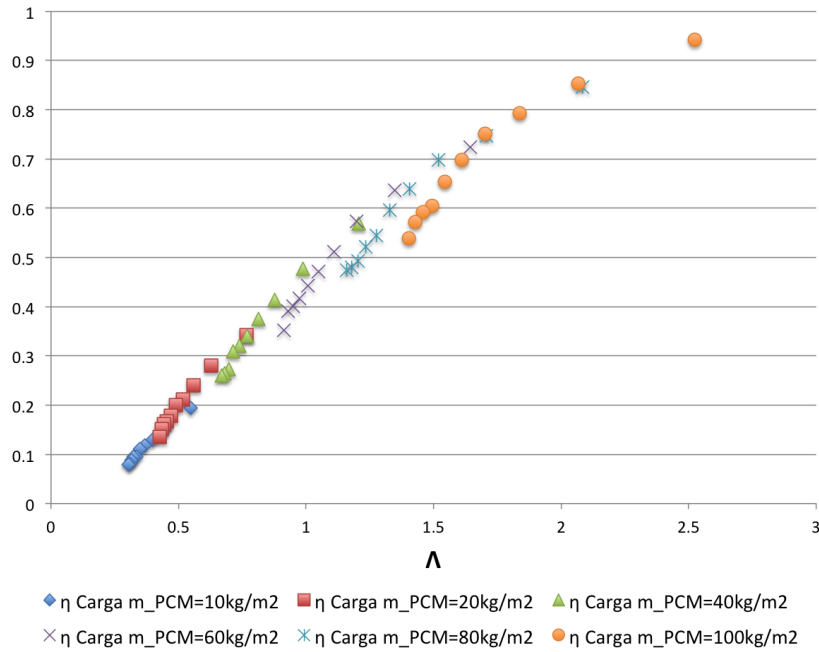


Figura 5.8: Rendimiento de fachada como intercambiador regenerativo para distintas cantidades de PCM. Carga

de la eficiencia global se dispara.

La relación entre  $\Pi_{Carga}$  y  $\Pi_{Descarga}$  en este estudio de casos se muestra en las figuras 5.13 y 5.14. Como se aprecia el comportamiento como intercambiador regenerativo es mucho más estable en carga que en descarga. No se ha representado el valor de cantidad de PCM igual a cero puesto que el parámetro  $\Pi$  tendería a infinito.

Este estudio como intercambiador se ha hecho para carga y descarga. En los estudios siguientes se hará únicamente para la carga ya que las condiciones de descarga están fijadas con una temperatura determinada que no corresponderá con la de utilización de la fachada y por tanto los valores obtenidos no tienen por qué ser representativos.

En la figura 5.15 se muestra nuevamente la variación de la Eficiencia Global  $\varepsilon_{GF}$  en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM. En ella se ve claramente a qué densidad de PCM corresponde cada una.

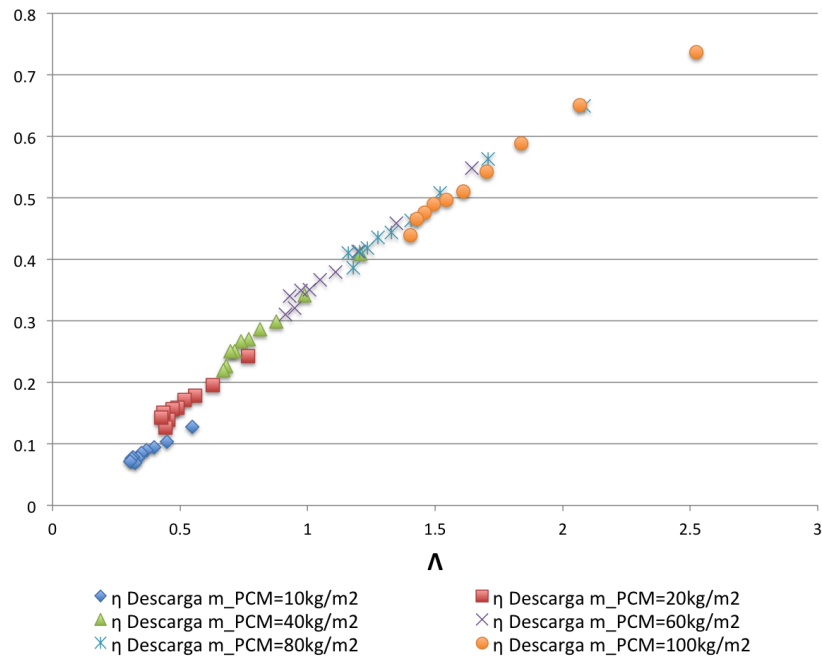


Figura 5.9: Rendimiento de fachada como intercambiador regenerativo para distintas cantidades de PCM. Descarga

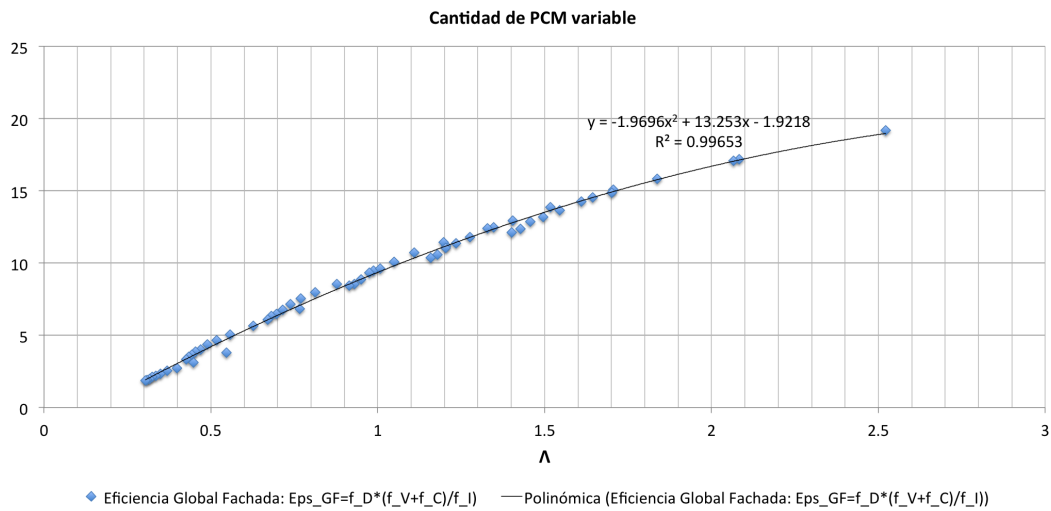


Figura 5.10: Eficiencia Global de Fachada Rendimiento de fachada  $\varepsilon_{GF}$  en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM

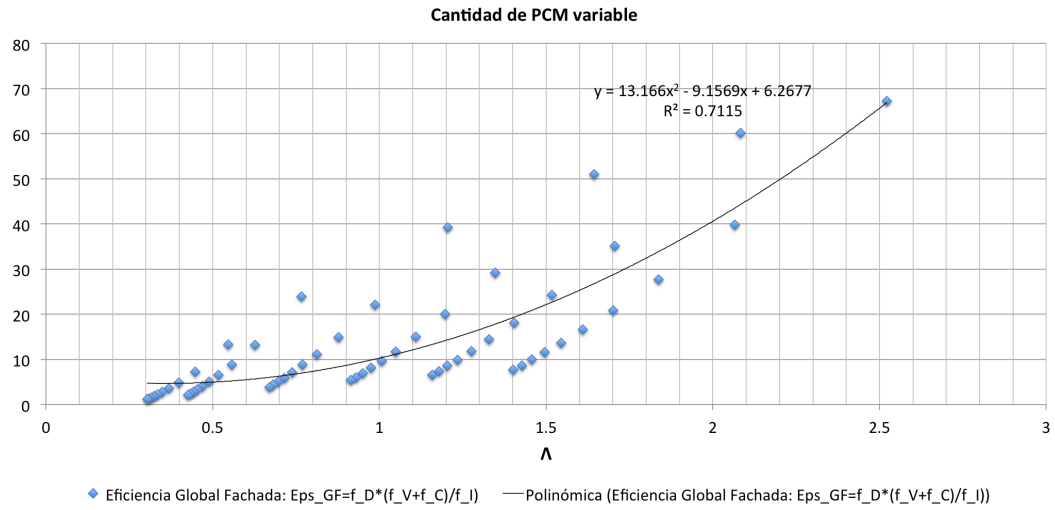


Figura 5.11: Eficiencia Global de Fachada Rendimiento de fachada  $\varepsilon_{GF}$  en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM. 2

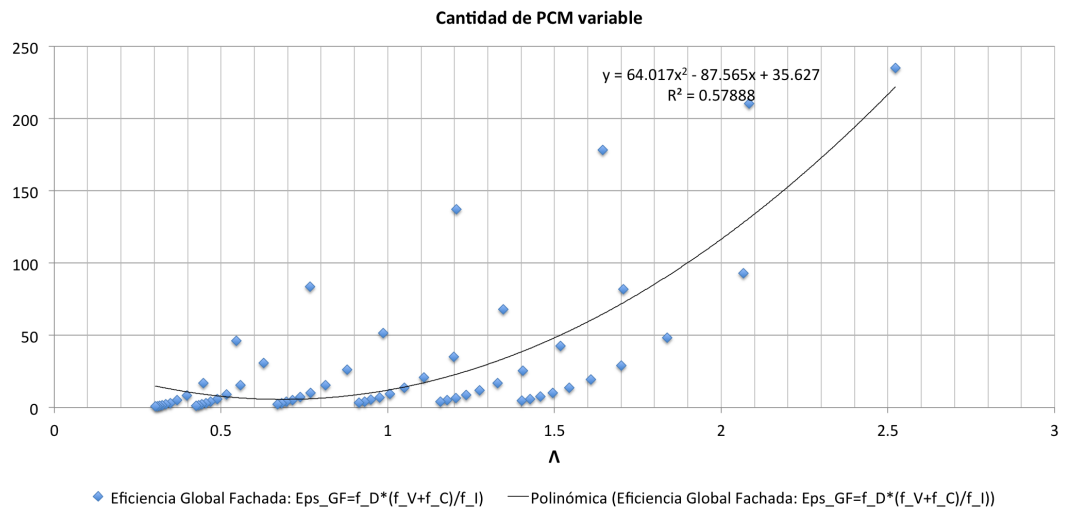


Figura 5.12: Eficiencia Global de Fachada Rendimiento de fachada  $\varepsilon_{GF}$  en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM. 3

Como se ha dicho, una mayor eficiencia de la fachada no indica una mayor cantidad de energía cargada y descargada. Para probarlo y para dar un orden de magnitud del valor de la energía de carga y descarga en el periodo

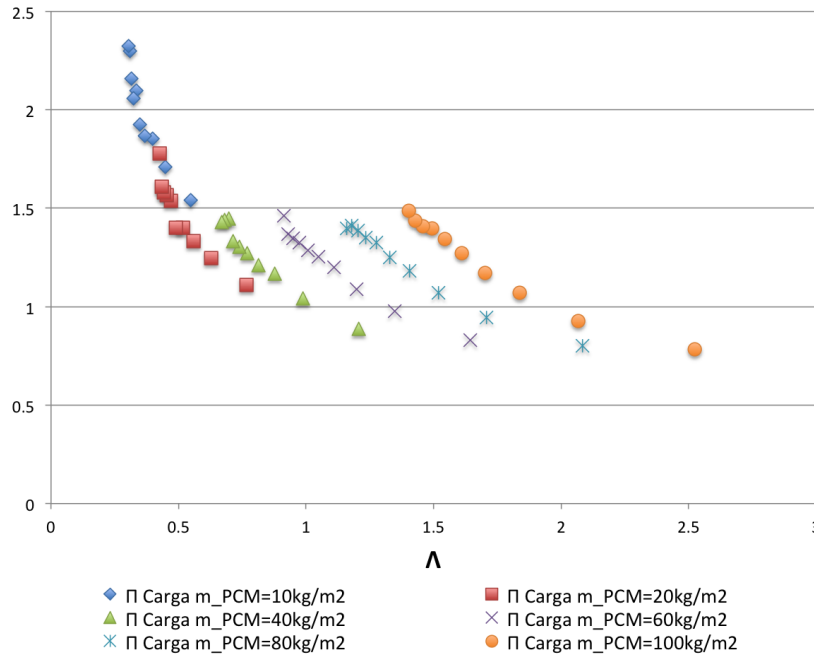


Figura 5.13: Variación del parámetro  $\Pi_{Carga}$  en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM

de dos meses, se incluyen las figuras 5.16 y 5.17 en las que se relacionan la Energía de carga y descarga en relación con  $\Lambda$ . Nótese lo elevados que son estos valores medidos en  $kWh/m^2$  debido a la alta densidad de PCM.

Por último cabe incluir una comparación del resultado que se obtiene mediante la simulación y la estimación desarrollada en el apartado 4.7. En la figura 5.18 se recoge esta comparación de los modelos simplificados sobre la fachada anteriormente analizada. Como se puede apreciar el valor más frecuente de  $\Pi$  está comprendido entre 1 y 1,5; rango en el que se dibuja una línea de tendencia logarítmica.

Es de destacar la gran similitud obtenida de dos métodos tan diferentes. Las diferencias son debidas sin duda a las simplificaciones de los modelos. A todas luces la comparación muestra las posibilidades de desarrollo de estimaciones basadas en el segundo método.

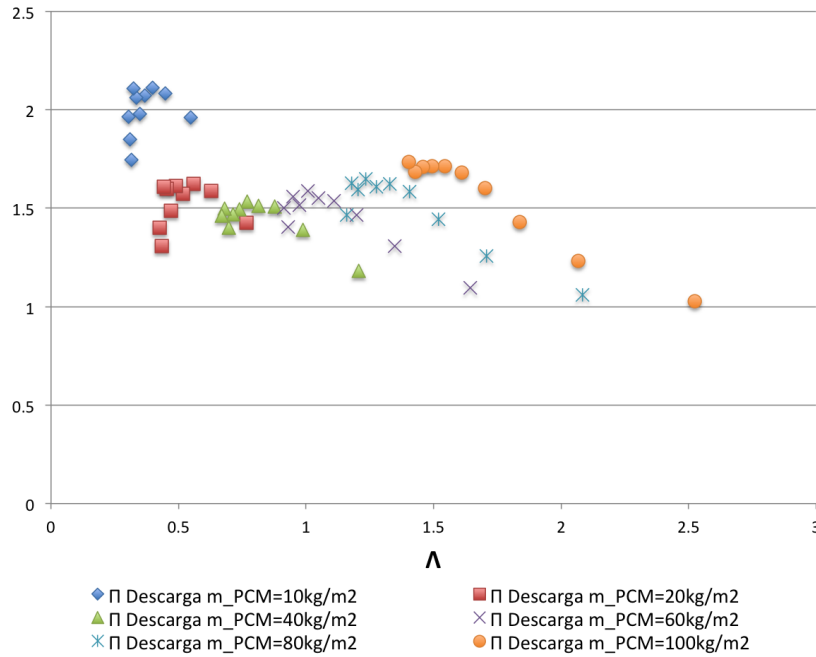


Figura 5.14: Variación del parámetro  $\Pi_{Descarga}$  en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM

### 5.3.2.3. Indicadores de eficiencia

Una vez estudiada la fachada como intercambiador regenerativo y la Eficiencia Global se pasa a analizar la dependencia funcional del resto de los indicadores.

Con el objetivo de que los resultados de las simulaciones marquen claramente la dependencia funcional de los indicadores con respecto a la variación de las variables (aislamiento, inercia, clima, cantidad de PCM y velocidad) se modifica el modelo de la fachada de estudio. Para ello se define una nueva fachada genérica compuesta por un elemento exterior doble (masivo al exterior y aislado por el interior), la cámara que contiene el PCM y el muro interior (aislado hacia la cámara y masivo hacia el interior). La definición completa del modelo de fachada se recoge en la tabla 5.3.

Esta tipología de fachada no corresponde con ninguna definida ni real ya que trata de modelar un conjunto amplio de tipos de fachada posibles. Dado que los valores de aislamiento e inercia varían desde cero a un valor determinado, la combinación de casos muestra fachadas de reducido aislamiento



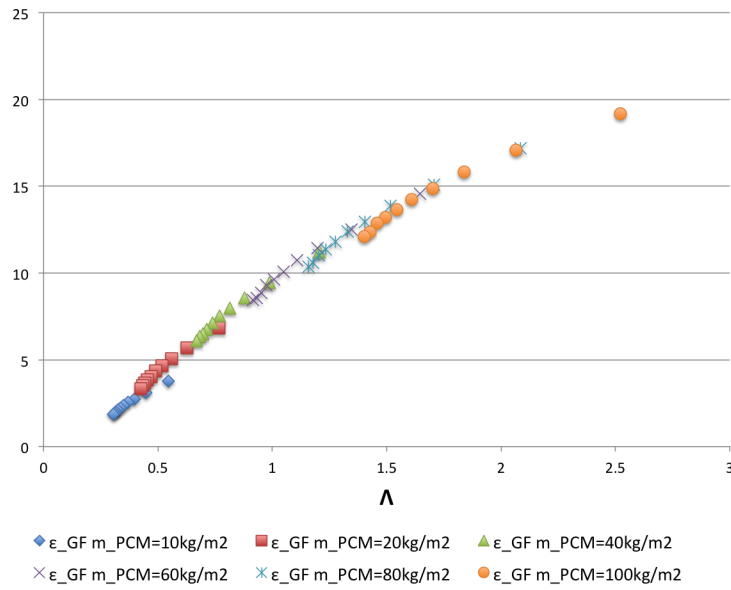


Figura 5.15: Eficiencia Global  $\varepsilon_{GF}$  en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM

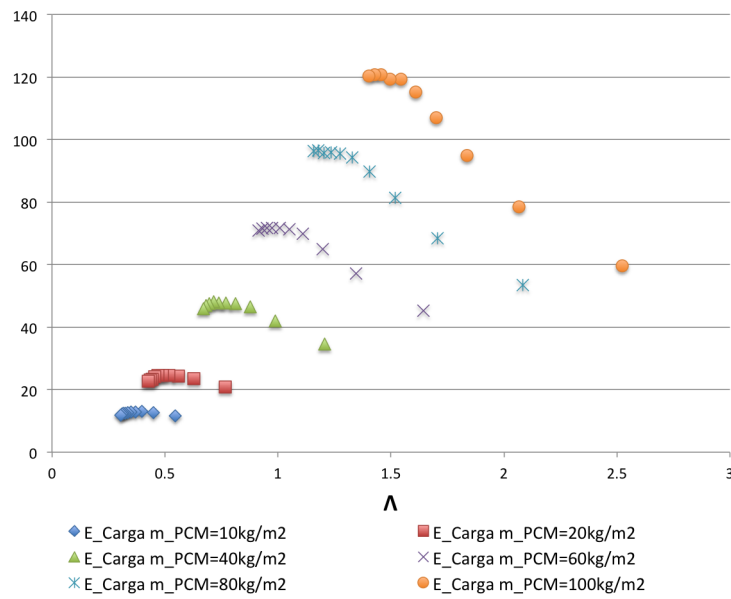


Figura 5.16:  $E_{Carga}$  en kWh/m<sup>2</sup> de fachada en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM

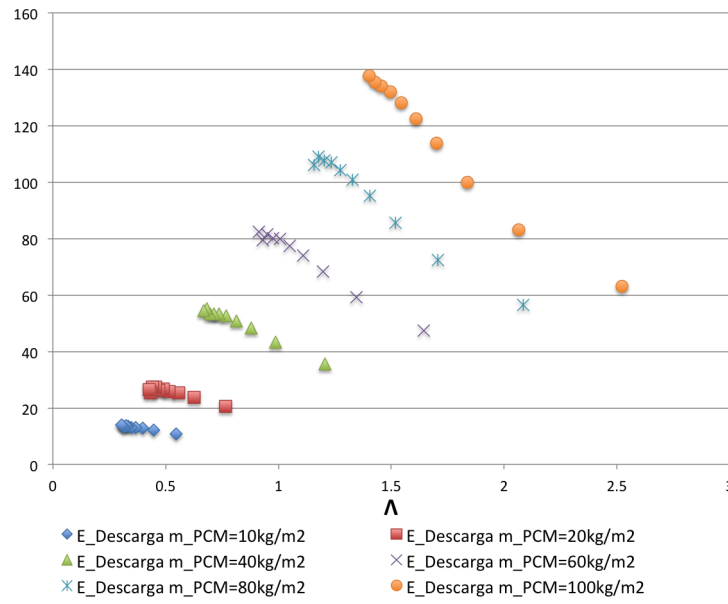


Figura 5.17:  $E_{Descarga}$  en  $kWh/m^2$  de fachada en función de  $\Lambda$  para distintas cantidades de PCM

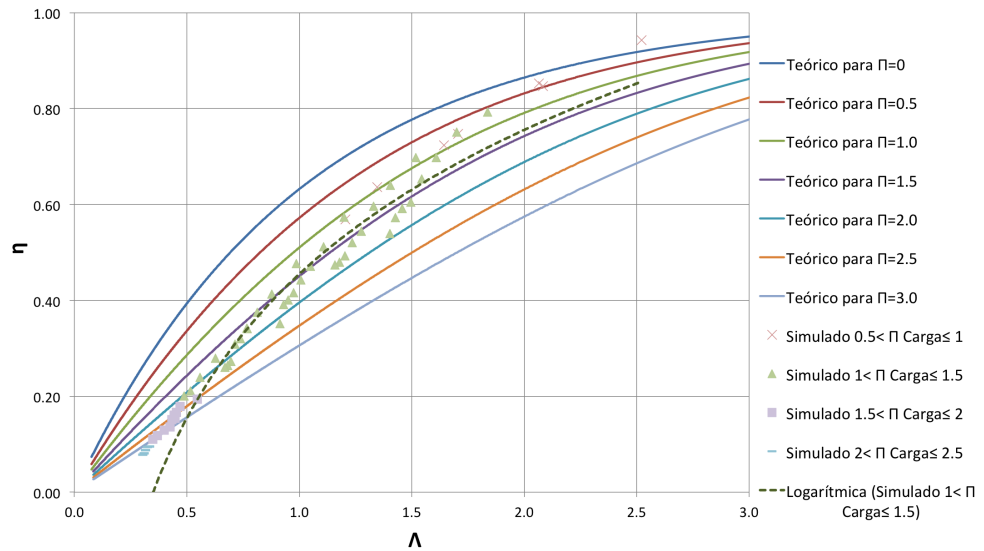


Figura 5.18: Rendimientos teóricos y de simulación de intercambiador regenerativo para valores de  $\Pi$  comprendidos entre 0 y 3

e inercia térmica. Se mantienen los valores geométricos de la fachada original.

El estudio propuesto toma como caso base la fachada con elemento exterior aislante de 4 *cm* de espesor, cámara con 74,5 *kg* de PCM por *m*<sup>2</sup> de fachada y como hoja interior muro de 12 *cm*. Estos valores se mantendrán constantes en las simulaciones salvo en la variable para la que se estudia su sensibilidad. El clima base será el de Madrid.

La combinación de variables da un total de 360 casos, fruto de la siguiente combinatoria:

Seis localidades con SCV (severidad climática de verano) creciente: Cuenca, Madrid, Lleida, Granada, Cáceres y Sevilla.

Seis posibles cantidades de PCM en la fachada por *m*<sup>2</sup>: 0 *kg/m*<sup>2</sup>, 20 *kg/m*<sup>2</sup>, 40 *kg/m*<sup>2</sup>, 60 *kg/m*<sup>2</sup>, 80 *kg/m*<sup>2</sup> y 100 *kg/m*<sup>2</sup>. En este punto se quiere destacar que dado que esta es una variable fundamental se ha querido dar desde valores muy bajos a excesivamente altos.

Seis posibles elementos exteriores masivos de espesor: 0,00 *m*, 0,05 *m*, 0,10 *m*, 0,15 *m*, 0,20 *m* y 0,25 *m*. Igualmente debe notarse que el caso de espesor nulo supone la ausencia del elemento por lo que se darían configuraciones difícilmente construibles.

Seis posibles elementos interiores masivos de espesor: 0,05 *m*, 0,10 *m*, 0,15 *m*, 0,20 *m*, 0,25 *m* y 0,30 *m*. En este caso se comienza en 0,05 *m*, ya que de comenzar en cero daría soluciones sin elemento interior. No se pretende que las soluciones elegidas sean constructivas en la realidad.

Seis combinaciones de aislamiento del elemento exterior: 0,02 *m*, 0,04 *m*, 0,06 *m*, 0,08 *m*, 0,10 *m* y 0,12 *m*. El aislamiento se dispone al interior de la cámara.

Seis combinaciones de aislamiento del muro interior: 0,02 *m*, 0,04 *m*, 0,06 *m*, 0,08 *m*, 0,10 *m* y 0,12 *m*. El aislamiento se dispone al interior de la cámara, es decir aislamiento por el exterior del muro.

Diez velocidades de funcionamiento: 1,0 *m/s*, 1,5 *m/s*, 2,0 *m/s*, 2,5 *m/s*, 3,0 *m/s*, 3,5 *m/s*, 4,0 *m/s*, 4,5 *m/s* y 5,0 *m/s*.

En el estudio se decide variar simultáneamente cada una de las variables

Tabla 5.3: Fachada ideal para cálculo de la dependencia de indicadores.

Elemento exterior: Hoja exterior de fábrica, interior aislante	
Hoja exterior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,00 a 0,25
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,00 a 0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	0 a 100
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Aislante exterior, hoja interior de fábrica	
Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,00 a 0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Hoja interior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,05 a 0,30
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60

con la velocidad. Esto se hace así por lo enriquecedor que supone poder obtener los gráficos en función de  $\Lambda$ .

El resultado gráfico de todas las simulaciones se recoge en el Apéndice A, apartado A.1, página 243.

### **Energía de Carga** $E_{Carga}$ .

Antes de estudiar los indicadores se comprueba cómo varían los parámetros  $E_{Carga}$  y  $E_{Descarga}$  en estas combinaciones. En la figura A.1 se puede observar esta variación.

Se comprueba que  $E_{Carga}$  depende fundamentalmente del clima, la cantidad de PCM y la velocidad (valores menores de  $\Lambda$  implican mayor velocidad). Una menor SCV permite mayores cargas.  $E_{Carga}$  es prácticamente independiente de las demás.

### **Energía de Descarga** $E_{Descarga}$ .

$E_{Descarga}$  es mayor para SCV altas, mejora con la inercia y aislamiento del elemento exterior, siendo prácticamente independiente de la configuración del muro interior. Al igual que  $E_{Carga}$  es mayor para velocidades altas y mayor densidad de PCM.

Los valores de  $E_{Descarga}$  están en el rango de  $40 \text{ kWh}/\text{m}^2$  de fachada a más de  $100 \text{ kWh}/\text{m}^2$ . Son el resultado de la descarga acumulada de los meses de julio y agosto. Se quiere destacar lo altos que resultan estos valores si se comparan con las necesidades de refrigeración habituales de edificación, sobre todo residencial.

La demanda del Código Técnico de la Edificación cifra un valor límite  $D_{ref,lim}$  de  $15 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$  para las zonas climáticas de verano 1, 2 y 3 y  $20 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$  para la zona climática de verano 4. Los  $\text{m}^2$  se refieren a superficie útil, no a superficie de fachada. Esta comparación es interesante de cara mostrar la utilidad del almacenamiento con PCM. En la figura A.2 se muestran los resultados obtenidos.

**Factor de utilización**  $f_U = \frac{E_{Descarga}}{E_{máx.Descarga}}$

El factor de utilización se comprueba que es muy dependiente de la velocidad (a mayor velocidad mayor  $f_U$ ) y prácticamente independiente del clima, a no ser que no exista demanda de refrigeración. Para velocidades altas es cercano a la unidad. Se necesita una cantidad mínima de PCM para que se desarrolle, en los casos analizados más de  $40kg/m^2$ . Mejora con el aislamiento e inercia del elemento exterior (menos pérdidas), siendo independiente de la configuración del muro interior. A velocidades bajas la descarga es menor frente a la máxima descarga, menor energía descargada y mayores pérdidas. En la figura A.3 se muestra gráficamente el comportamiento de este indicador.

**Factor de equilibrio**  $f_E = \frac{E_{máx.Descarga}}{E_{Carga}}$

El comportamiento en relación con el clima es muy estable. En un rango de velocidades altas es inferior a la unidad, la energía de descarga es inferior a la de carga, para velocidades menores la tendencia se invierte, lo que indicaría que no llega a desarrollarse por completo la carga; es decir que existe una mayor capacidad de descarga frente a la carga, y también que hay mayores pérdidas.

Es estable con la variación de la cantidad de PCM y sensible al aislamiento interior y exterior y la inercia interior y exterior. En el rango bajo de velocidades la relación con el aislamiento se acentúa, esto puede ser debido a que la fachada proporciona los valores mayores de carga y descarga por lo que cuentan más las pérdidas, sobre todo en los momentos de parada. Para velocidades bajas también se nota debido previsiblemente a que mejora el comportamiento de carga y descarga. En la figura A.4 se muestran gráficamente los resultados obtenidos en las simulaciones.

**Factor de carga real**  $f_{Cr} = \frac{E_{Carga}}{E_{máx.Carga}}$

Aumenta con la velocidad hasta un rango que empieza a disminuir ligeramente. El comportamiento con el clima es bastante estable, se aprecia ligeramente un valor mayor para SCV altas, que se acentúa para velocidades bajas. Llega a tomar valores superiores a la unidad que mejoran con el aislamiento e inercia; cuanto menores sean las pérdidas menor necesidad de carga. Para velocidades bajas, en las que no se desarrolla totalmente la carga

esta tendencia se invierte al mejorarse la carga.

Al aumentar la cantidad de PCM el indicador se aproxima a la unidad. Para valores muy bajos de PCM es superior a uno lo que indicaría una mayor carga que la prevista, es decir que las condiciones climáticas permitirían mayores cantidades de PCM. Al existir un mayor potencial se desarrolla almacenamiento en forma de calor sensible. En la figura A.5 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones.

**Factor de carga de diseño**  $f_{Cd} = \frac{E_{m\acute{a}x.Carga}}{E_{Dise\tilde{n}o\ carg a}}$

Está directamente afectado por el clima, menores SCV dan valores mucho mayores del indicador. Mide claramente el potencial de enfriamiento en relación con el clima. Aumenta ligeramente con la cantidad de PCM y la velocidad. Con mayor velocidad se consigue una mayor activación para un clima dado. Es independiente al resto de factores. En la figura A.6 pueden verse los resultados obtenidos.

**Factor de instalación**  $f_I = \frac{C_{vent}}{C_{Dise\tilde{n}o.vent}}$

Depende muy directamente de la velocidad, debe notarse que el consumo de diseño de los ventiladores se calcula en relación con su potencia nominal (denominador) siendo constante. Aumenta con la cantidad de PCM, mayor necesidad de ventilación. Se diría que disminuye al aumentar la SCV, debido seguramente a que la capacidad de descarga y carga son menores y por tanto el tiempo de funcionamiento de los equipos también es previsiblemente menor. En la figura A.7 se muestran los resultados.

**Factor de diseño**  $f_D = \frac{E_{Dise\tilde{n}o\ carg a}}{C_{Dise\tilde{n}o.vent}}$

Depende exclusivamente de las condiciones de diseño y por tanto de la cantidad de PCM por lo que es independiente de la velocidad. La inercia, aunque en menor medida influye en  $E_{Dise\tilde{n}o\ carg a}$  lo que se aprecia muy ligeramente. Véase la figura A.8.

**Factor de ventilación**  $f_V = \frac{E_{Descarga}}{E_{Dise\tilde{n}o\ carg a}}$

El factor de ventilación es el producto de los factores de utilización, equilibrio, carga real y de diseño. Depende directamente del clima obteniendo mejores valores para climas con menor SCV, mayor capacidad de carga y de enfriamiento mediante la descarga. Aumenta con la cantidad de PCM y es sensible a la inercia y aislamiento de los elementos exterior e interior. La figura A.9 muestra los valores obtenidos para este indicador.

**Factor del efecto cámara**  $f_C = \frac{E_C}{E_{Diseño\ carga}}$

El factor del efecto cámara  $f_C$  mide la estabilidad térmica de la cámara. Depende de forma importante del clima siendo más beneficioso en climas con SCV alta. Disminuye con la cantidad de PCM, esto es así no porque la energía del efecto cámara sea menor, es prácticamente constante e independiente de la cantidad de PCM, sino porque el valor de  $E_{Diseño\ carga}$  es muy superior a mayor cantidad de PCM, es decir el indicador lo que muestra es la importancia del efecto cámara frente al global de la fachada.

Está directamente influenciado por el aislamiento e inercia exterior, pero sobre todo del interior. Cuanto más aislado o más inercia tenga el muro interior menor será la influencia del efecto cámara. La figura A.10 muestra los valores obtenidos. En la figura 5.19 se muestra una simulación durante un año completo de la fachada base, se puede observar la estabilidad térmica que la cámara supone para el edificio durante el verano, y también durante el invierno.

**Eficiencia Global de la fachada**  $\varepsilon_{GF} = f_D \cdot \frac{f_V + f_C}{f_I}$

La Eficiencia Global de la Fachada  $\varepsilon_{GF}$ , como no puede ser de otra forma, está influenciada por todas las variables. Sin embargo es de destacar su estabilidad frente a los climas, notándose una mayor eficiencia en las localidades de Cuenca y Granada que con certeza marca las temperaturas mínimas nocturnas menores. La  $\varepsilon_{GF}$  es sensible al aislamiento e inercia del elemento exterior pero muy poco sensible al aislamiento e inercia del muro interior, entre otros motivos ya que la energía suministrada mediante la ventilación es de un rango muy superior a la del efecto cámara. La figura A.11 muestra los resultados obtenidos.



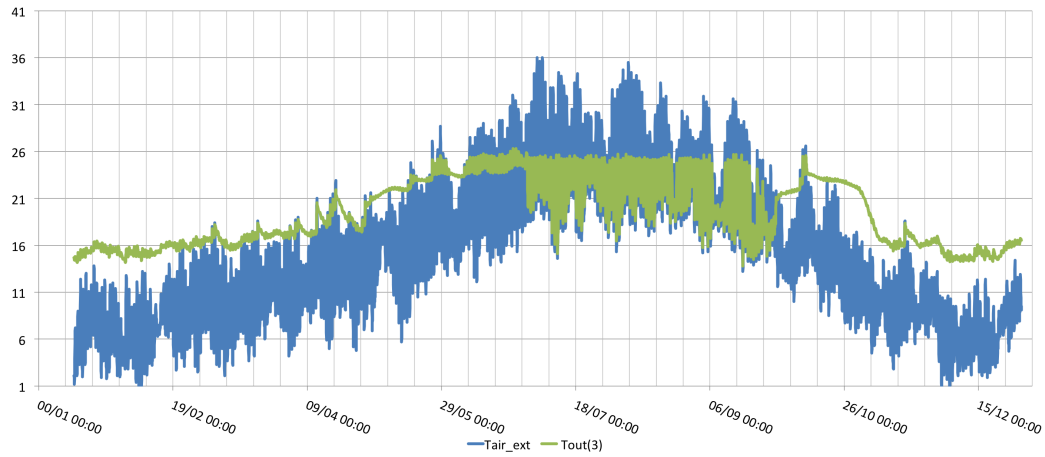


Figura 5.19: Simulación de año completo. Temperatura del aire exterior y en la cámara.

#### Fachada como intercambiador regenerativo $\eta$ :

Por último queda estudiar nuevamente la fachada como intercambiador regenerativo. Las nubes de puntos obtenidas indican que el clima es decisivo para el funcionamiento así como la cantidad de PCM. El resto de variables muestra un comportamiento más estable.

Se observa que para una misma configuración  $\eta$  y  $\varepsilon_{GF}$  proporcionan información diferente. Como se puede apreciar climas con mayor potencial de carga se corresponden con  $\eta$  menores, no siendo así en cuanto a valores de  $\varepsilon_{GF}$ . Cuanto mayor sea el potencial de carga la temperatura media de carga diferirá más de la temperatura de cambio de fase y por ello el rendimiento del sistema como intercambiador regenerativo será peor, o lo que es lo mismo habrá que conseguir una mayor diferencia entre la temperatura de entrada y salida del aire en la carga para aumentarlo; lo que necesariamente implica una reducción de la velocidad.

Es decir al aumentar la capacidad debido a las condiciones de carga aunque la fachada tenga un mejor comportamiento en general, como el rendimiento del intercambiador es bajo se pueden hacer acciones para incrementarlo aún más.

Los casos estudiados se muestran en la figura A.12, igualmente en el apéndice.

## 5.4. Utilización como herramienta de prediseño

Como se ha visto el clima juega un papel fundamental en el funcionamiento de los sistemas de almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase. Es necesario pues un estudio en cierto detalle del clima para poder predecir el comportamiento de estos sistemas. En el apéndice B se estudia éste desde el punto de vista del potencial disponible en relación con esta tecnología.

Para poder predecir el comportamiento en función del clima se define Potencial de carga  $Pot_{Carga} (GH)$  como el producto del número de horas en las que la temperatura exterior es inferior al de una temperatura de referencia por el valor de la temperatura de referencia menos la temperatura exterior. La temperatura de referencia será la de fusión del PCM. Igualmente se define un Potencial de carga restringido  $PotR_{Carga} (GH)$ , que indica lo mismo que el  $Pot_{Carga} (GH)$  pero restringido a un intervalo horario prefijado.

La energía cargada por el sistema se definía en 5.16 como:

$$E_{Carga} = \int_{Carga} \dot{m}_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot (T_{out} - T_{in}) dt \quad (5.22)$$

Multiplicando y dividiendo por  $\int_{\tau} (T_{PCM}(t) - T_{in}(t))$  se obtiene:

$$E_{Carga} = \dot{m}_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot \frac{\int_{\tau} (T_{out}(t) - T_{in}(t)) dt}{\int_{\tau} (T_{PCM} - T_{in}(t)) dt} \cdot \int_{\tau} (T_{PCM} - T_{in}(t)) dt \quad (5.23)$$

Como se puede observar y en relación con la ecuación 4.149, lo anterior se puede escribir como 5.24, siendo el potencial de carga total, o reducido a un intervalo horario.

$$E_{Carga} = \dot{m}_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot \eta \cdot Pot_{Carga} \quad (5.24)$$

Para comprobar la correspondencia entre la estimación anterior y el modelo se estudia la dependencia con el clima y la cantidad de PCM de forma análoga a como se hizo en el estudio de la dependencia de indicadores, apartado 5.3.2.3, haciendo uso de la fachada allí indicada.

En la figura 5.20 se representa en función de  $\Lambda$  los valores obtenidos en la simulación con el modelo simplificado nivel 1 frente a los estimados

en los climas seleccionados. El valor estimado de  $E_{Carga}$  se obtiene mediante la expresión 5.24 para la fachada seleccionada y usando los valores de  $PotR_{Carga}$  (GH) recogidos en la tabla B.3 en los distintos climas.

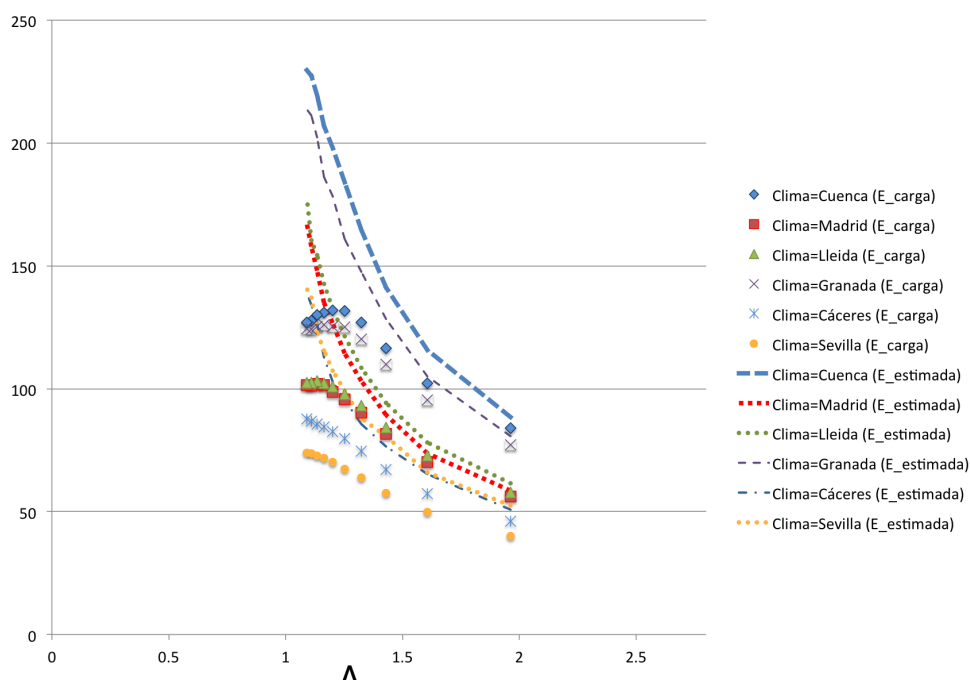


Figura 5.20: Comparativa de  $E_{Carga}$  estimado y obtenido mediante simulación para distintos climas

En general se observa que la correlación de ambas es creciente con el valor de  $\Lambda$ , es decir para velocidades bajas, lo que es acorde con lo esperado. En general el valor estimado es algo mayor que el obtenido mediante simulación. La correspondencia es mejor en los climas medios y en aquellos con mayor potencial climático. En climas muy cálidos (Cáceres y Sevilla) la diferencia entre el valor estimado y el obtenido por simulación es más acusada.

Del mismo modo en la figura 5.21 se incluye la comparativa del comportamiento de la fachada para el caso de Madrid para distintas cantidades de PCM.

Igualmente la correlación mejora con el valor de  $\Lambda$ . La estimación en el caso de Madrid se observa muy buena.

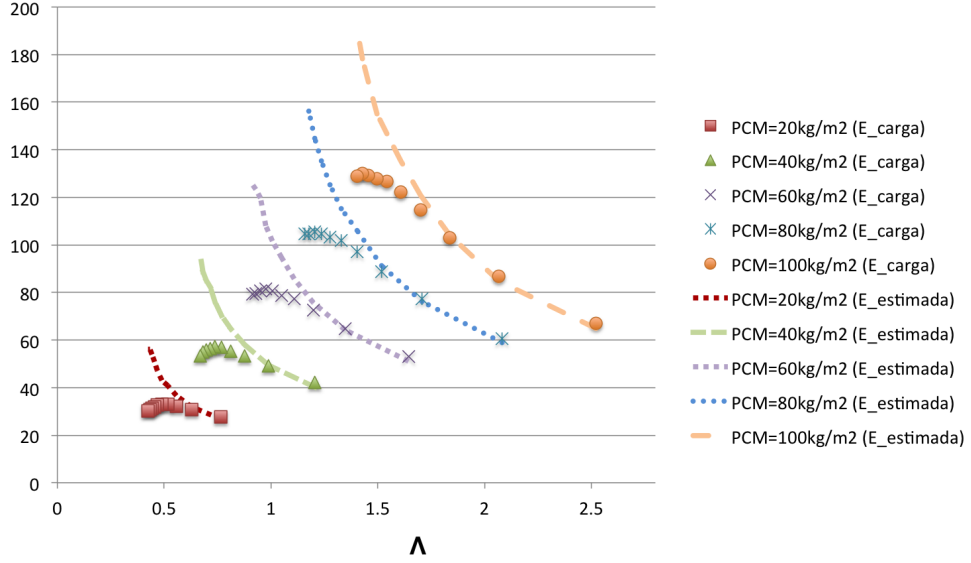


Figura 5.21: Comparativa de  $E_{Carga}$  estimado y obtenido mediante simulación para distinta cantidad de PCM

Por otra parte,  $E_{Diseño carga}$  se definía en 5.21. Si se desprecia la inercia de la fachada, lo cual es válido para la estimación al ser muy inferior al primer sumando, se puede decir:

$$E_{Diseño carga} = N \cdot \left[ m_{PCM} \cdot \lambda + \int m \cdot Cp \cdot (T_{máx} - T_{mín}) dT \right] \approx N \cdot m_{PCM} \cdot \lambda \quad (5.25)$$

Siendo  $N$  el número de ciclos de carga.

La estimación anterior de  $E_{Diseño carga}$  es muy válida. Aplicado igualmente al caso de la fachada usado en el estudio de la dependencia de indicadores del apartado 5.3.2.3, para los distintos climas, se obtiene un valor estimado de  $E_{Diseño carga} = 135 \text{ kWh/m}^2$ . El valor obtenido mediante la simulación del modelo nivel 1 es de  $135,25 \text{ kWh/m}^2$  en Cuenca, Madrid y Granada. En Lleida el valor medio de los casos simulados resultó ser  $134,59 \text{ kWh/m}^2$ , Cáceres  $131,76 \text{ kWh/m}^2$  y Sevilla  $130,45 \text{ kWh/m}^2$ . Las diferencias vienen dadas no porque este indicador dependa del clima sino porque el número de ciclos es variable al no producirse carga durante todas las noches del período considerado.

En el caso de cantidad de PCM variable para el clima de Madrid se observa una gran correspondencia entre el valor estimado y el resultante del modelo. Los resultados se reflejan en la tabla 5.4. Puede observarse que cuanto mayor es la cantidad de PCM es mejor el ajuste al tener menos importancia relativa la masa de la fachada, que sí se tiene en cuenta en el modelo.

Tabla 5.4: Comparación de  $E_{Diseño\ carga}$  calculado con el modelo y estimado en  $kWh/m^2$ , meses julio y agosto. Madrid

$E_{Diseño\ carga} (kWh/m^2)$	Modelo	Estimado
PCM=0 ( $kg/m^2$ )	6,72	0
PCM=20 ( $kg/m^2$ )	41,22	36
PCM=40 ( $kg/m^2$ )	75,73	72
PCM=60 ( $kg/m^2$ )	110,23	108
PCM=80 ( $kg/m^2$ )	144,73	144
PCM=100 ( $kg/m^2$ )	179,24	180

Como se ha visto en el apartado anterior se puede obtener un valor teórico aproximado de los parámetros  $E_{Carga}$  y  $E_{Diseño\ carga}$ . Recordando la definición de los indicadores de evaluación de la eficiencia propuestos en el capítulo 5, apartado 5.1.2.1, por definición se puede decir:

$$f_{Cr} \cdot f_{Cd} = \frac{E_{Carga}}{E_{Diseño\ carga}} = \frac{\dot{m}_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot \eta \cdot Pot_{Carga}}{N \cdot m_{PCM} \cdot \lambda} \quad (5.26)$$

Esta expresión es fácilmente calculable haciendo uso del desarrollo teórico del intercambiador regenerativo expuesto en el apartado 5.3.2.2, el resto de valores se obtienen directamente en función de los parámetros de diseño de la solución. Realmente la influencia del clima está recogida en el término  $f_{Cd}$  ya que  $f_{Cr}$  es más estable y cercano a la unidad a velocidades altas.

Con el objetivo de estimar la eficiencia global de la fachada  $\varepsilon_{GF}$  a través de los factores definidos de cara a un posible diseño previo sería necesario estimar el factor de utilización  $f_U$ , el factor de equilibrio  $f_E$  y el factor de instalación  $f_I$ , además del factor del efecto cámara  $f_C$ .

El producto de  $f_U$  y  $f_E$  es la relación entre la  $E_{Descarga}$  y la  $E_{Carga}$ , es decir las pérdidas. La estimación en función de parámetros de diseño es inmediata puesto que además de depender del clima influirá también el uso del

sistema.

No obstante como se verá tanto  $f_U$  como  $f_E$  pueden ser cercanos a la unidad a velocidades altas. Como las mejores eficiencias se obtienen cuanto menor sea la velocidad se debe estimar su producto con un valor menor. En principio un valor de 0,8 sería aceptable para esta aproximación.

Para conocer el  $f_I$  es necesario saber la ley de variación del consumo con la velocidad y lo que es más difícil de prever, el número de horas de funcionamiento. De los casos estudiados y bajo las hipótesis que se han hecho en los modelos podría ser cercano a 0,5.

Dado que el efecto de la cámara es de un orden muy inferior a la ventilación (un 5 % aproximadamente), el factor del efecto cámara  $f_C$  se podría despreciar.

El resto de valores necesarios para calcular la Eficiencia Global del sistema de Fachada  $\varepsilon_{GF}$  así calculado vienen dados por los parámetros de diseño.

En cualquier caso una forma rápida de estimar la eficiencia global de la fachada para una velocidad dada se puede obtener directamente como una fracción del resultado de dividir el valor estimado de  $E_{Carga}$  por el consumo estimado de ventiladores. Este último se puede aproximar como una fracción del producto de su potencia nominal por el tiempo de funcionamiento (carga más descarga), que será algo menor del previsto en las condiciones operacionales.

## Capítulo 6

# Integración y viabilidad

En este capítulo se discute la integración de los materiales de cambio de fase como soluciones de almacenamiento estructural de energía que puede contribuir al ahorro energético de los edificios, estudiando su viabilidad.

La discusión se hará en general para los distintos tipos de elementos constructivos que componen el edificio para centrar la misma en las fachadas ventiladas, al ser el elemento constructivo sobre el que se ha hecho un desarrollo en mayor profundidad de los métodos de simulación. Los resultados pueden servir como ejemplo y método para el estudio de otras soluciones. Los valores obtenidos aunque no sean directamente extrapolables al resto de posibles integraciones sí pueden servir de cota u orden de magnitud del potencial del almacenamiento; sobre todo para los elementos no sometidos tan directamente al clima exterior.

El análisis de viabilidad podría hacerse con el enfoque del ciclo de vida completo del elemento integrado en el edificio (de la cuna a la tumba). El análisis de ciclo de vida (ACV) se está convirtiendo cada día más en una metodología de evaluación de la "sostenibilidad" yendo más allá de lo meramente económico. La sostenibilidad trata de evaluar a través de indicadores los aspectos ambientales, sociales y económicos relacionados con el edificio a lo largo de su vida. Debe medirse a nivel de edificio para tener en cuenta todas las fases del proceso desde el suministro a obra de los materiales y productos, la puesta en obra, durante la vida útil en servicio, el mantenimiento, la reposición, etc. y por último el fin de vida, demolición y reciclaje. Un completo análisis de ACV de los materiales de cambio de fase y su uso en construcción excede claramente el objeto de esta tesis. En cualquier caso el almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase no será viable si técnicamente no es posible o no es eficiente desde el punto de vista ener-

gético, y no será viable si no es rentable desde el punto de vista económico.

La discusión se centrará fundamentalmente en los aspectos técnicos.

## 6.1. Elección de los materiales de cambio de fase

Existe una gran variedad de materiales PCM disponibles en el mercado como se ha visto en el estado del arte. La tecnología a nivel de material está bastante desarrollada.

En cualquier caso la elección de materiales pasa por escoger los materiales de acumulación óptimos para cada aplicación y analizar sus propiedades termofísicas para que éstas queden garantizadas. Un aspecto que no tratan los modelos en general es el subenfriamiento. Para que no se separe mucho el comportamiento real del previsto en carga y descarga por el modelo se debe prestar atención a este hecho a la hora de elegir el material de cambio de fase más adecuado a la solución constructiva y al clima.

De las experiencias analizadas, tal y como se exponía en la valoración inicial (apartado 1.4), el principal problema es la activación. La activación depende fundamentalmente de dos aspectos, el potencial climático y la disposición del PCM.

Es evidente que cuanto mayor sea el potencial climático será más fácil la acumulación energética tanto si se piensa en calor como en frío. Referido a refrigeración, con un alto potencial se podrán utilizar materiales con una temperatura menor en el punto de fusión; siempre que se tenga garantizada la necesaria transferencia de temperatura debida al fluido de transporte. Si se piensa en soluciones mixtas de calefacción y refrigeración lo más adecuado será un material con el punto de fusión dentro del rango de las temperaturas de consigna.

La conductividad térmica de los materiales es también un factor determinante. En los casos de disponer grandes cantidades de PCMs se debe ir a diseños con una gran superficie de intercambio de calor, si no, la activación se hará en una pequeña fracción de este material.



De los materiales estudiados en la literatura se deduce que no existe demasiado problema en cuanto al ciclado y la durabilidad. Confinados adecuadamente no deben presentar incompatibilidad con el resto de elementos constructivos del edificio (corrosión).

El comportamiento ante el fuego no supone en principio un obstáculo en el uso de PCMs siendo subsanable con un diseño adecuado de las soluciones. Además de poder modificar las propiedades de algunos mediante retardantes, siempre se pueden confinar adecuadamente o establecer medidas limitantes del riesgo en caso de incendio.

## 6.2. Integración de PCMs en la edificación

La integración de los materiales de cambio de fase en los edificios para ser eficaz debe ser compatible con el uso normal de éstos. La integración por tanto viene condicionada por el diseño habitual del edificio en el que el espacio y su uso es relevante frente a otros factores.

El objetivo es analizar la integración de los elementos de almacenamiento estructural en el edificio, entendiendo el término "estructural" no como el de los elementos que sustentan el mismo, la estructura (soportes, forjados o muros de carga) y que transmite las acciones, cargas o solicitaciones, sino con un significado amplio de elementos constructivos.

Desde el punto de vista que nos ocupa por tanto no se distinguirán los elementos estructurales del edificio por su función meramente estructural (como esqueleto o soporte), sino por ser parte del edificio y darle forma. En general las soluciones constructivas encaminadas a la reducción de la demanda energética no tienen asociada la función estructural como elementos sustentantes, como es el caso de las fachadas. Sin embargo éstas deben sustentarse a sí mismas junto con tener la misión de transmitir las acciones que recaen sobre el edificio. Por ello, desde un prisma amplio, se considerarán y los elementos de la envolvente (fachadas y cubiertas) y los elementos de partición (forjados y elementos verticales) como candidatos a la integración estructural; independientemente de su función. En cualquier caso a los efectos energéticos esta distinción es irrelevante.

La integración de PCMs puede presentar distintos casos en cuanto a su principio de funcionamiento. El PCM puede concebirse como parte del edifi-

cio o formando parte de los sistemas de climatización, estando diseñado para mejorar el rendimiento del sistema o ser meramente un almacén de energía térmica.

El primer caso (como parte del edificio) estaría más centrado en la integración estructural, en los que el PCM se aloja en el seno de los elementos constructivos, embebido en los materiales o en su superficie. Se han mostrado numerosas experiencias que tratan del uso de las soluciones constructivas con PCM como medida de mejora de las prestaciones de los productos en cuanto a la inercia térmica.

En un punto intermedio entre las dos visiones, los sistemas de almacenamiento pueden entenderse como una máquina térmica renovable en sí mismos que almacena y descarga energía.

Cabría pensar por tanto en que estamos ante distintos tipos de integración ya sean sean sistemas totalmente pasivos, asistidos, o integrados en las instalaciones. Si nos abstraemos de las diferencias y pensamos en los puntos en común, es evidente que el PCM es un almacén térmico que precisa de una energía que almacenar y un sistema de transporte para hacerlo.

El edificio presenta en su interior distintos espacios donde albergar este almacenaje. Según su situación estarán más o menos cerca de los focos y sumideros térmicos (el exterior y los puntos de consumo). Igualmente estarán más o menos protegidos del exterior (pérdidas).

Se puede pensar en espacios existentes del edificio o crear nuevos espacios para ello. De hecho aunque los materiales PCM se integren el edificio lo hacen por adición o sustitución de otros materiales. Los espacios pueden estar situados en la envolvente o en el interior del edificio.

La envolvente tiene la ventaja de estar próxima al ambiente exterior y al ambiente interior, pero sobre todo presenta una gran superficie (fachada, cubierta, medianeras) necesaria para albergar el desarrollo superficial que el intercambio precisa; sobre todo cuando el intercambio se hace con aire como fluido transportador. La envolvente en mayor o menor medida también tiene el inconveniente de estar sometido a la radiación solar y la temperatura exterior cuando esto no resulta adecuado.

Cabe añadir que la afección sobre el edificio resultante de establecer una cámara interpuesta de éste y el ambiente exterior supone también contar con

una barrera térmica estabilizadora. Es como si el edificio viera un clima exterior distinto, el de la cámara.

En el interior de los edificios destacan por superficie los forjados y los elementos verticales de división (particiones interiores verticales). Es evidente que los forjados están casi siempre separados del ambiente exterior siendo adyacentes a los puntos de consumo (el interior de los edificios). Los forjados además tienen el contacto perimetral con la envolvente. Además los forjados (o más bien los techos) presentan una particularidad evidente que es la gran superficie en contacto con el aire interior de los espacios del edificio. Los techos se activan fácilmente por convección natural, mejor que los suelos. En refrigeración son muy adecuados no siendo tanto en calefacción puesto que generan poco bienestar y un efecto desagradable a la mayoría de usuarios.

En cuanto a las particiones se tiene el inconveniente de su lejanía con el foco o sumidero ambiental. La activación suficiente mediante corrientes de aire puede ser incompatible con el uso. Además las particiones pueden estar especializadas como elementos de separación entre usuarios lo que conlleva una alta exigencia acústica que implica casi siempre masa y siempre estancidad.

Se puede pensar en otros elementos donde integrar el PCM, cuando su disposición no requiera una gran superficie de contacto (depósitos). Aquí valdría cualquier espacio no habitable, bajo cubierta, sótanos, cámaras y patinillos, etc.; o incluso en la cimentación (geotermia superficial). La disposición de chimeneas con PCMs o cámaras específicas es también posible salvando los inconvenientes y limitaciones de espacio y conexión entre espacios que gobiernan y condicionan la arquitectura y el diseño de los edificios.

Distinguir en la integración estructural de PCMs las soluciones exclusivamente compuestas por elementos pasivos o la integración asistida en parte carece también de sentido. Dependerá de las condiciones de contorno y del diseño de la solución. La integración por tanto pasa por hacer uso de soluciones que combinen los elementos constructivos como elementos confinadores cuya activación requiere o no el uso de instalaciones, cuantas menos, mejor.

### 6.2.1. Requisitos técnicos para la integración estructural

Los sistemas que componen los edificios tienen asociadas funciones específicas definidas: cimentación (zapatas, pilotes, losas, muros y pantallas, etc.), estructura (soportes, muros, vigas, forjados, escaleras, etc.), compartimentación y cerramientos (cubiertas, fachadas, particiones, ventanas, puertas, etc.), instalaciones y sistemas de acondicionamiento ambiental (electricidad, pararrayos, iluminación, fontanería, saneamiento, evacuación de residuos, ascensores, montacargas u otros medios de transporte, gas y otros combustibles, telecomunicaciones, protección contra incendios, industriales, de acondicionamiento ambiental, ventilación, calefacción, refrigeración, energías renovables, etc.), equipamiento (baños, cocinas y lavaderos, equipamiento industrial, etc.), revestimientos y acabados (pavimentos, paramentos, techos, etc.) y defensa (barandillas, antepechos, elementos de protección, etc.). El conjunto de sistemas y subsistemas configuran el edificio y lo hacen apto para el uso previsto.

Para limitar la demanda energética de los edificios se recurre al aislamiento térmico de su envolvente y de los cerramientos y de las particiones interiores (pérdidas internas o robo de calor). Los edificios con alta inercia pueden contribuir (dependiendo del uso y clima) a la reducción de la demanda dado que actúan combatiendo la misma como si se tratase de sistemas de acondicionamiento dado que tienen la propiedad de almacenar calor, retrasando y estabilizando las oscilaciones climatológicas exteriores (solicitaciones). Las masas térmicas además pueden utilizarse posibilitando un aprovechamiento eficaz del ambiente exterior como energía renovable, lo que redundaría en la reducción del consumo.

Las prestaciones de los elementos constructivos dan respuesta a las exigencias en cuanto a seguridad estructural, comportamiento ante el fuego, seguridad en el uso, condiciones de accesibilidad, salubridad, comportamiento acústico y por último comportamiento térmico. Estas exigencias deben superar los mínimos reglamentarios establecidos por los gobiernos a fin de proteger a sus ciudadanos.

Las prestaciones de los elementos constructivos no siempre son diferenciadas, pudiendo un elemento dar respuesta a varias, sirva como ejemplo el elemento fachada que debe dar respuesta simultáneamente a los requisitos en cuanto a protección frente a la humedad, acústicos, térmicos y otros.

El almacenamiento térmico estructural supone imponer nuevos condicionantes a los sistemas constructivos al incorporar un elemento nuevo, el material de cambio de fase. Por ello se deben cumplir un conjunto de requisitos y condiciones técnicas.

Los requisitos y exigencias técnicas sobre la edificación son en general de aplicación sobre el edificio y los distintos elementos constructivos que lo componen. Estos requisitos ya sean reglamentarios o de parte del cliente o usuario condicionan el diseño y los materiales del edificio. La respuesta en forma de prestaciones la proporcionan los distintos productos de construcción bien en solitario, como elementos especializados, o en conjunto como elementos constructivos complejos.

Por lo anterior la integración estructural debe tratar de forma amplia las soluciones constructivas como sistema. Los requisitos exigibles a dichas soluciones constructivas serán por tanto los habituales de la construcción (estructurales, de protección contra incendio, salubridad-humedad, acústicos) más los derivados de su comportamiento térmico.

### **6.2.2. Idoneidad de las soluciones de integración estructural de los PCMs**

Es obvio que el consumo energético para alcanzar el bienestar térmico de los edificios depende fundamentalmente del clima y del uso característico del edificio. Mediante un correcto diseño se puede disminuir la demanda energética y por tanto el consumo asociado de los sistemas energéticos. Mediante la integración y el aprovechamiento energías renovables puede proporcionarse una fracción de esta energía. La integración estructural de los PCMs ayuda a combatir las cargas térmicas. La cuestión es realizar la integración de una forma óptima.

En el nuevo reglamento de energía Documento Básico del Código Técnico de la Edificación (2013) se limita el consumo de energía primaria no renovable y la demanda de energía, incluyendo también el uso de las energías renovables. El almacenamiento estructural mediante elementos de cambio de fase es una forma más de hacer uso de energía renovable.

Los elementos constructivos tradicionales en general son muy masivos en la práctica habitual de nuestra construcción ya sean estructurales y no es-

tructurales. Sin embargo los sistemas constructivos más ligeros van ganando terreno frente a los pesados por sus ventajas en cuanto a industrialización y puesta en obra. En otros países, sobre todo en los que vienen de una tradición en el uso de madera en construcción, los elementos constructivos son más ligeros. En éstos casos el mero hecho de usar PCMs supone de forma eficaz proporcionar inercia térmica por lo que resulta ventajoso sobre todo en los usos edificatorios que conllevan muchas horas de ocupación y baja densidad de cargas internas, como es el caso de vivienda. La inercia no siempre supone ahorro pero en general supone bienestar y reduce el funcionamiento de las instalaciones con carga parcial.

La principal diferencia entre las soluciones constructivas tradicionales y las que se proponen es que incluyen en su composición materiales especialmente concebidos y dispuestos para almacenar energía en forma de calor sensible y calor latente, y de cederla posteriormente al espacio adyacente. En sentido estricto todos los materiales tienen la capacidad anterior, que es tanto mayor cuanto mayor sea su capacidad calorífica (producto de la densidad del material por su calor específico,  $\rho \cdot C_p$ ).

Sin embargo, esta capacidad es mucho mayor en materiales susceptibles de cambiar de fase ya que el calor latente asociado al cambio de estado ( $\lambda$ ) es de un orden de magnitud bastante superior al calor sensible derivado de los cambios de temperatura.

Las soluciones estudiadas en general consisten en la integración de materiales PCM en la superficie o en el seno de las soluciones constructivas. El problema de la activación de los materiales se resuelve mediante un fluido capaz de transportar el calor, ya sea aire o agua y que esté en contacto con el foco caliente y el sumidero térmico.

Por último no se debe olvidar que una solución será idónea solo si es apta para el uso previsto cumpliendo todas las exigencias, en mayor o menor grado, pero por encima de los valores reglamentariamente requeridos.

### 6.2.3. Tipos de integración estructural de los PCMs

Los materiales de cambio de fase pueden disponerse recubriendo los elementos constructivos, formando parte de la masa del elemento o de alguna de sus capas o dispuestos en capas, espacios o receptáculos establecidos ex profeso.

Lo anterior no es excluyente de soluciones mixtas de los tipos anteriores. Piénsese por ejemplo en un elemento masivo que incorpore una proporción importante de PCM en una de sus caras. La distinción anterior se realiza exclusivamente a los efectos de discusión para analizar algunas particularidades en la integración.

#### **6.2.3.1. Elementos constructivos recubiertos con PCMs**

El PCM en general es solicitado mediante el aire que circula por el exterior del cerramiento del que absorbe o cede calor. Al elemento puede llegarle la radiación solar.

El comportamiento se asimila a un elemento constructivo de alta inercia térmica. La eficacia del sistema viene condicionada por la capacidad de transferir calor al ambiente a través de convección libre.

En caso de disponerse el PCM como elemento de refrigeración la dificultad radica en el alto grado de ventilación nocturna necesaria en el espacio.

#### **6.2.3.2. Elementos constructivos con PCM embebido en su interior**

El PCM se alberga en el interior formando parte del material del elemento constructivo. El elemento es solicitado bien a través de su superficie o mediante un sistema de conductos dispuestos en su interior por los que circula el aire o agua. El fluido intercambiará calor con el PCM que lo tomará de una fuente o disipará en un sumidero existiendo o no recirculación.

La principal dificultad es la compatibilidad de materiales. En el caso de ser elementos resistentes (hormigón) pueden sufrir mermas de la resistencia aunque existen ya experiencias realizadas con éxito. Siempre se puede recurrir al microencapsulado. El material del elemento constructivo, el encapsulado y el mismo PCM suponen un freno a la activación dado que en el interior del elemento la transferencia térmica es por conducción.

Este tipo sería compatible y añadiría valor a los forjados térmicamente activos. Para que sea eficiente el calor debe venir preferentemente de una fuente renovable o de aprovechamiento de un calor residual. Este uso cobra especial interés combinado con instalaciones de energía renovable, cogenera-

ción o para sistemas de rendimiento variable. En refrigeración el sistema de disipación es fundamental para el buen funcionamiento de los sistemas ya que el calor que el fluido de trabajo absorbe del edificio (foco caliente) debe cederlo de manera eficiente a un sumidero medioambiental de calor (foco frío) para poder seguir actuando de forma efectiva.

En edificios con uso prolongado como es el caso de viviendas se puede concebir el sistema como un elemento estabilizador de la temperatura interior. El sistema así concebido sería de aplicación también en las estaciones frías. El calor producido durante un corto período de tiempo ya sea proveniente de captación solar, el aprovechamiento de un calor residual, cogeneración o de una máquina térmica (que funcione con un mayor rendimiento) se almacenaría en forma de cambio de fase para ser transferido a lo largo del día.

En el caso de emplear agua como fluido de trabajo, es posible disipar el calor mediante intercambiadores aire-agua o bien mediante estanques que pueden estar integrados en la estructura del edificio o emplearse en el riego de cubiertas verdes u otros usos.

#### **6.2.3.3. Estabilización térmica mediante cambio de fase**

Esta es la disposición estudiada a lo largo de esta tesis. El PCM es un elemento añadido que utiliza espacios nuevos creados donde alojarse (cámaras de aire) o hace uso de oquedales en los sistemas constructivos (aligeramientos de los forjados).

El funcionamiento del elemento puede diseñarse para apoyo a calefacción, refrigeración o ambas. Para que la transferencia de calor sea posible el fluido debe estar en contacto con el elemento por lo que se requiere una gran área de transferencia. El transporte de calor se produce por conducción y fundamentalmente por convección. En el caso del aire, para ser eficaz, es necesario un alto coeficiente de transferencia lo que a velocidades bajas no se produce por lo que puede ser imprescindible el empleo de ventiladores de modo que la convección sea forzada.

En caso de disponerse el PCM como elemento de refrigeración, como se ha visto, el aire puede o no entrar en contacto con el ambiente interior del edificio y puede tomarse y expulsarse al exterior no siendo imprescindible la recirculación.



En el caso de sistemas de enfriamiento puede recurrirse además, siendo compatible, con el empleo de técnicas de enfriamiento evaporativo para reducir la temperatura del aire exterior hasta la temperatura de bulbo húmedo, durante la noche, lo que permite un uso mayor y más eficiente del sistema.

En la concepción de los sistemas podría establecerse el uso de PCM como elemento de refrigeración exclusivamente para las estaciones cálidas. El elemento PCM utilizará como foco frío la noche para transferir el calor acumulado durante el día. Como en general el fluido de trabajo es el aire por la noche, este no se hace recircular, sino que una vez utilizado su potencial energético de absorción de energía el aire es expulsado al exterior, continuando el proceso con la toma de aire fresco procedente del entorno. Esto sucede tanto en fachadas ventiladas como en forjados alveolares con aire circulante.

Esta hipótesis de funcionamiento no estacional casa perfectamente con los climas mediterráneos y continentales en los que durante muchos días al año las temperaturas nocturna y diurna presentan variaciones significativas. Sería especialmente indicado para usos con baja carga interna como sustitutivo de la refrigeración, aunque hubiera momentos de falta de confort, o como apoyo a los sistemas de refrigeración en uso terciario al "laminar" la punta de consumo.

### **6.3. Integración de PCMs en elementos constructivos.**

Para que la integración de los materiales de cambio de fase sea una realidad deben incorporarse de forma natural al proceso edificatorio creando soluciones sencillas, preferiblemente industrializadas. El proyectista debe tener herramientas a ser posible simplificadas, para poder determinar el tipo de integración más eficaz en cada caso y poder dimensionar adecuadamente los sistemas.

De cara a su comercialización se deben desarrollar en el mercado empresas especializadas en este tipo de tecnología. Dado el gran desconocimiento de los proyectistas de estas técnicas es conveniente la elaboración de guías de diseño con planos tipo que definan constructivamente las aplicaciones, e indicaciones para su puesta en obra.

La documentación debe incluir la elaboración de fichas con los modelos necesarios para cuantificar correctamente la cantidad de material de cambio de fase necesario para cada aplicación según el uso del edificio y el clima donde dicho edificio se encuentre. Se deben dar pautas para un correcto dimensionado de los sistemas auxiliares necesarios e instalaciones e indicadores para que desde la etapa de diseño se verifique que el funcionamiento es el correcto.

### 6.3.1. Criterios

La integración de materiales de cambio de fase (PCM) en edificación es a todas luces viable técnicamente como se ha puesto de manifiesto en las experiencias analizadas. El problema reside en resolver eficazmente la activación de estos elementos ya sea de forma pasiva o forzada mediante circulación de agua o aire como fluido transmisor de la energía.

La utilización de agua como elemento de transporte de energía en principio parece suponer una menor dificultad de cara a la integración de los elementos PCM en los sistemas y elementos constructivos del edificio. El sistema sin embargo requiere de un conjunto de intercambiadores en cadena para transferir el calor. Al ser el agua un elemento interpuesto precisará de un intercambiador forzado al exterior y un segundo interior, lo que incrementa el consumo energético del sistema.

Las soluciones estudiadas se reducen a la integración de sistemas basados en el aire, lo que no implica que puedan diseñarse otros igualmente efectivos.

Puede pensarse que los sistemas basados en el cambio de fase no sean viables para todos los climas, sin embargo no deben descartarse puesto que el uso de PCM puede ser un complemento perfecto para otro tipo de tecnologías en las que el calor o el frío se produzca en momentos puntuales.

En el diseño del sistema debe fijarse claramente el objetivo para el cual se va a usar el elemento PCM como almacén de energía bien como elemento de refrigeración, calefacción o ambos, o como elemento de estabilización térmica asociado a los sistemas de climatización. El periodo de carga podría ser diario o estacional. El almacenamiento estacional con este tipo de PCMs requeriría una gran cantidad de material, lo que por precio se hace inviable.

Para el dimensionado es necesario conocer el perfil de uso del edificio y sus necesidades derivadas de éste y de las cargas internas, así como la clima-

tología (cargas externas). Además de los condicionantes arquitectónicos de los edificios derivados de las necesidades (tamaño de espacios, iluminación u otros) o de aspectos estéticos e incluso culturales (superficie vidriada, protección del patrimonio en rehabilitación, etc.)

Para estudiar la integración arquitectónica de los sistemas PCM se analizarán los elementos del edificio de cara a estudiar su viabilidad. La idea reside en la integración estructural de los sistemas estudiados.

En la integración arquitectónica de los sistemas PCM se pensará pues en la doble vertiente invierno verano. Dado que el sistema no será capaz de mantener las condiciones de bienestar de los edificios no se puede pensar en eliminar el uso de instalaciones. Los sistemas se conciben como un elemento de ahorro energético o de estabilización térmica de los edificios.

En la integración estructural de los sistemas PCM se atenderá a los siguientes criterios:

- Economía. Las soluciones constructivas no deben sufrir un incremento de precio significativo
- Sencillez. Los procedimientos constructivos de ejecución o bien no deben alterarse especialmente respecto a los tradicionales o bien deben diseñarse para que su puesta en obra sea sencilla.
- Fiabilidad. Una vez colocado el sistema PCM el funcionamiento del mismo debe estar garantizado no siendo sensible a los pequeños errores de ejecución.

### 6.3.2. Integración de PCMs en fachadas

Los tipos de fachada utilizados en edificación son muy variables. Como primera clasificación podríamos encontrar los siguientes tipos:

- Fachadas de fábrica. Compuestas por un elemento exterior (cara vista o con revestimiento) con o sin cámara de aire, siendo la cámara de aire ventilada o no, aislamiento por el interior y trasdosado.
- Fachadas de hormigón. Compuestas por hormigón in situ y aislamiento por el interior.

- Fachadas con aislamiento por el exterior. Compuestas por una piel a modo de revestimiento, adherida o fijada mecánicamente, aislamiento y cerramiento interior. Son los llamados SATE.
- Fachadas ventiladas o trasventiladas. Compuestas por un cerramiento continuo o discontinuo, cámara, aislante y elemento soporte. El cerramiento generalmente se sostiene al elemento soporte mediante una estructura externa.
- Fachadas ligeras. Formadas por paneles tipo sándwich con alma aislante o cualquier otro tipo de sistema constructivo, incluso vidriado.
- Fachadas pesadas industrializadas. Compuestas por paneles prefabricados con aislamiento por el interior.
- Fachadas de GRC. No ventilada. Aislamiento por el interior.
- Fachadas de entramado estructural de madera o metálico, aislamiento en el entramado y trasdosado.
- Muros cortina.
- Otros: Dobles muros, muros trombe, etc.

Las fábricas pueden ser cerámicas, bloques de hormigón o piedra. Existen fachadas basadas en la tierra como material de construcción (tapial, fábrica de adobe, BTC, etc.), su uso es reducido.

Los tipos de fachadas industrializadas son muy variables. Podemos distinguir los ligeros de los pesados. En general las fachadas ligeras de paneles se utilizan en terciario y fundamentalmente para naves industriales, la cara interior es el acabado. Los paneles industrializados pesados pueden ser macizos, tipo sándwich, y bicapa de aislamiento continuo. Las geometrías (lisos o nervados), acabados (lisos, rayados, chorreados, con relieve, revestidos, etc) y forma de colocación son muy variadas. Existen muchos tipos diferentes propios de cada fabricante.

Por lo general los paneles de cerramiento albergan en su interior elementos de aligeramiento que les confieren además un mejor comportamiento térmico. Las dimensiones son muy variables, los espesores de 12 a 25 cm. son habituales, anchos de 1,20 m, y longitudes de 6 a 12 metros.

La integración de los elementos PCM en fachadas tradicionales no parece en principio sencilla. El espesor normal de las cámaras de aire de 3 o 4 cm. no es suficiente. Además los elementos PCM deben estar algo aislados del exterior para disminuir pérdidas. Aumentar el espesor de las fachadas en ocasiones no resulta conveniente por condicionantes arquitectónicos y puede suponer pérdida de espacio útil.

Las fachadas industrializadas van ganando terreno a las tradicionales para todo tipo de edificios. La integración en fachadas industrializadas parece más sencilla. Los paneles por lo general (excepto bicapas y sándwich) requieren de un complemento de aislamiento. Los elementos PCM pueden albergarse pues en el intradós, de forma que quedarían aislados del exterior. Esto sería especialmente válido en cerramientos de zonas en la que las pérdidas de espacios no sean significativas.

Las fachadas ligeras de entramado tienen el mismo problema que las de fábrica, la disposición de sistemas PCM requeriría de un elemento adosado a éstos, especialmente diseñado para dejar una cámara en su interior.

En el apartado 6.4 se proponen ocho tipos de fachada susceptibles de incorporar elementos de cambio de fase. En estas fachadas se analiza el comportamiento en cuanto a energía descargada y los indicadores definidos para distintas configuraciones y climas.

La puesta en obra de las fachadas puede ser por el interior del edificio en construcción, por el exterior requiriendo andamios (lo más usual) o ejecutarse con medios de elevación (fachadas industrializadas). En todos los casos la ejecución de los elementos adicionales no supone en principio ninguna complicación técnica añadida.

### 6.3.3. Integración de PCMs en cubiertas

Pudiera pensarse que la cubierta es un caso especial de fachada, para las cubiertas inclinadas, o de forjado para las cubiertas planas. De hecho en cubiertas inclinadas el elemento interior para la formación de pendiente actúa como un elemento más de sustentación y en las planas el elemento soporte es un forjado más del edificio.

Las cubiertas inclinadas se clasifican en general en función de cómo sea el forjado que las conforma, horizontal o inclinado. Tanto en los casos de

cubierta inclinada como de cubierta plana se puede dejar o no una cámara ventilada a efectos de facilitar la disipación de calor en verano.

Las cubiertas planas son diferentes si son o no transitables por su acabado pero fundamentalmente si son o no ventiladas. Pueden ser normales o invertidas si el elemento aislante está por debajo o por encima del impermeabilizante. Existen también cubiertas ligeras.

Las experiencias de uso de PCM en cubiertas van más del lado de la calefacción que de la climatización, aunque bien aislado del exterior el establecimiento de una cámara para albergar el PCM es perfectamente posible con ambos objetivos. En cubiertas inclinadas cuando los espacios bajo cubierta no sean habitables en vez de hacer una cámara con la inclinación de la cubierta es más razonable hacer uso de estos espacios para la disposición del PCM. El hecho de disponer una cámara con PCM como barrera térmica es posible pero existen soluciones alternativas muy interesantes, además de la simple ventilación, como son las cubiertas ajardinadas o inundables.

Para la climatología española con una insolación tan potente como elemento de refrigeración en principio parece más acertado la disposición del PCM en otros elementos constructivos mucho menos expuestos.

El uso de espacios bajo cubierta para albergar grandes cantidades de PCM es perfectamente posible y posiblemente muy adecuado para viviendas unifamiliares o edificios de otros usos de una o dos plantas. En el caso de naves industriales se suelen ejecutar mediante sistemas ligeros de cubierta en una sola capa sin ventilación. En estos casos puede ser muy positivo usar sistemas en los que el PCM se disponga a en la cara interior o formando una pequeña cámara con un techo suspendido; siempre que se provocara una ventilación nocturna adecuada para su activación. Estas disposiciones pueden ser útiles en edificios industriales, ganaderos y de uso agrícola.

Igualmente al caso de fachadas la puesta en obra no resulta especialmente compleja, aunque supone un sobre coste frente a una cubierta tradicional.

#### **6.3.4. Integración de PCMs en forjados**

Los tipos de forjado utilizados en edificación se pueden clasificar en función del procedimiento constructivo, en sistemas industrializados y ejecutados in situ.

#### 6.3.4.1. Forjados industrializados

En general la tendencia a usar sistemas industrializados dependerá de la tipología del edificio y su uso. En general se usan más los sistemas industrializados en grandes edificios predominantemente de uso terciario. Podemos encontrar los siguientes tipos:

**Losas alveolares:** Las losas alveolares o placas son elementos longitudinales de sección constante de hormigón para la construcción de forjados unidireccionales. Su sección presenta una serie de alveolos longitudinales de aligeramiento. Son elementos pretensados. Figura 6.1

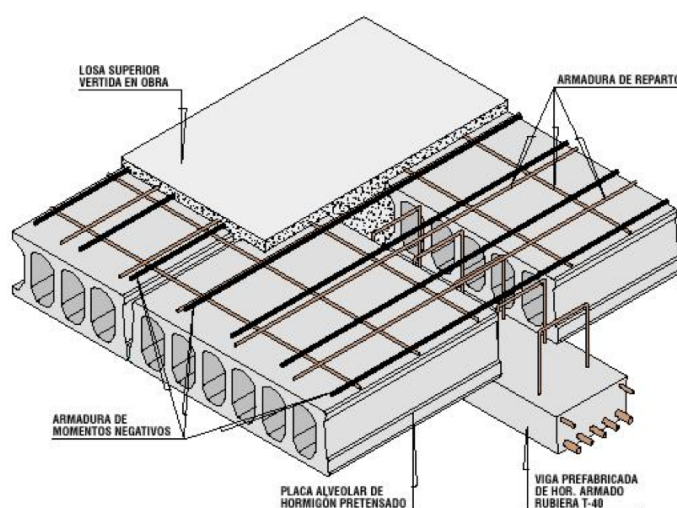


Figura 6.1: Forjado mediante losas alveolares. Imagen: Rubiera Predisa

La utilización de losas permite grandes luces y altas sobrecargas con cantos reducidos. Su ventaja principal reside en la facilidad y rapidez de ejecución. Durante el proceso constructivo no se requieren sopandas.

El canto de las placas es variable en función de las luces y cargas a soportar, son habituales cantos de 20 a 40 cm. Las placas tienen un ancho habitual de 1,20 m.

Para la construcción del forjado las losas se apoyan en ambos extremos en vigas o jácenas que suelen ser prefabricadas en forma de T invertida. En la cara superior se extiende una capa de hormigón de compresión. También

se pueden apoyar sobre muros de carga.

La integración de elementos PCM en este tipo de forjados es sencilla haciendo uso de los alveolos como elemento de conducción y confinamiento. El volumen de los alveolos es significativo respecto al volumen total del forjado.

La integración del PCM puede venir incorporada desde fábrica en elementos específicamente diseñados para contener el material, lo que redunda en la calidad del elemento final construido.

En algunas piezas los alveolos no son iguales por lo que algunos modelos podrían no ser aprovechables lo que siempre puede reconfigurarse. Figura 6.2

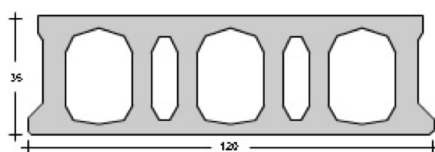


Figura 6.2: Losa alveolar. Imagen: Hormipresa

Para la integración de los elementos PCM en este tipo de forjados debe tenerse en cuenta que sería necesario establecer elementos de conexión de los alveolos para la entrada y salida del aire y su extracción. En los apoyos habituales las jácenas supondrían una barrera para ello que podría ser salvable reconfigurando éstas. La perforación de la cara superior e inferior es posible teniendo precaución de no debilitar la sección, especialmente en las zonas cercanas a los apoyos.

**Prelosas:** Se llama prelosa a un elemento prefabricado de hormigón de sección constante compuesta por una losa con nervios longitudinales. Las prelosas funcionan como encofrado perdido, evitando el encofrado del forjado durante la construcción aunque no la disposición de apeos.

Entre los nervios se disponen elementos continuos de poliestireno expandido o cerámicos de relleno y aligeramiento. El forjado una vez armado se hormigona.



En esta tipología se pueden englobar los paneles planos aligerados que suelen ser unidireccionales aunque también pueden ser reticulares.

La integración de elementos PCM en este tipo de forjados se podría realizar sustituyendo los elementos aligerantes por otros que incorporaran el material PCM en su interior. Figura 6.3

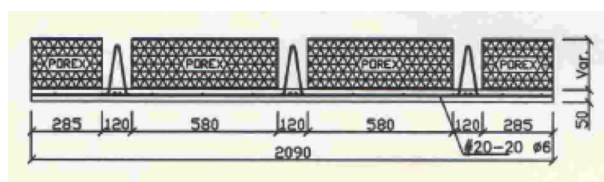


Figura 6.3: Forjado con prelosas. Imagen: Preinco

**Forjados pi:** Se denominan así a una tipología de forjados compuestos por elementos formados por una losa o placa superior y dos nervios que contienen la armadura longitudinal. Pueden tener en ocasiones una placa inferior y nervios transversales.

En su puesta en obra son autoportantes, no necesitan apeos y la capa de compresión puede realizarse in situ o ser parte del elemento prefabricado. Figura 6.3

La integración de elementos PCM es posible bajo el forjado, los sistemas podrían venir instalados de fábrica o preparados para montarse in situ para ser colgados en anclajes preparados al efecto.

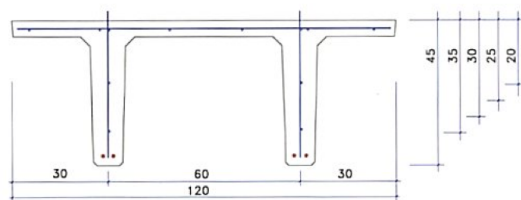


Figura 6.4: Forjado Pi. Imagen: Prefabricats de Catalunya

**Forjados de chapa colaborante:** Este tipo de forjado se compone de una chapa sobre la que se dispone una losa. La chapa sirve de encofrado y es colaborante con el armado del forjado para absorber tracciones.

Los forjados de chapa colaborante son forjados llamados mixtos y suelen corresponderse con estructuras metálicas por lo que dejan espacios bajo el mismo que pueden servir de hueco a elementos que contengan los PCM. Figura 6.5

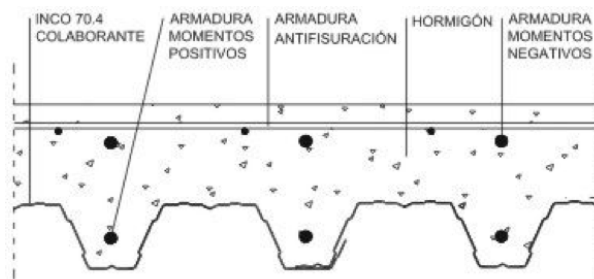


Figura 6.5: Forjado con chapa colaborante. Imagen: Incoperfil

#### 6.3.4.2. Forjados " in situ "

Los forjados in situ se pueden clasificar en unidireccionales y losas (placas y forjados reticulares).

**Forjados unidireccionales:** Los forjados unidireccionales han sido durante años los más utilizados en edificación, forjados de vigueta y bovedilla. Existen muchos tipos en función del elemento resistente y el elemento de aligeramiento: cerámico, hormigón o poliestireno. Todos ellos tienen en común la disposición de vigas o viguetas dispuestas en una dirección y unidas entre sí mediante elementos más ligeros sobre todo ello se extiende una capa de compresión.

El espacio entre viguetas depende del tipo de bovedilla, pero por lo general estas son de 60-70 cm.

El uso de estos forjados está muy extendido en edificación residencial, aunque la exigencia de encofrado bajo las bovedillas por motivos de seguri-

dad hace que empiecen a ser desplazados por las losas y sobre todo por los forjados reticulares que permiten mayores luces con un menor canto. Figura 6.6

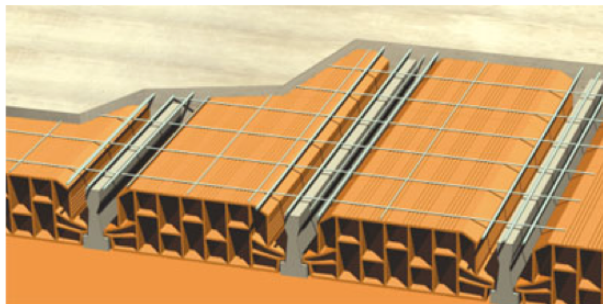


Figura 6.6: Forjado unidireccional de vigueta y bovedilla. Imagen: Hispalyt

En forjados se suelen usar las llamadas vigas planas, es decir con el mismo canto del forjado, sin descuelgue, son menos eficaces pero se integran mejor en el proyecto arquitectónico.

Existen otros materiales utilizados en tiempos pasados pero de creciente uso actual, forjados de madera, metálicos, etc.

La integración de elementos PCM se realizaría incluidos en los elementos de aligeramiento o en sustitución de éstos. La integración del PCM requeriría un diseño especial de bovedilla que pudiera conectarse con la siguiente (lo que no resulta sencillo) para garantizar la continuidad de los conductos.

**Losas:** Las losas pueden ser macizas (placas) o aligeradas. En este último grupo se engloban los llamados forjados reticulares.

Las losas macizas tienen el inconveniente de ser elementos muy pesados pero con gran capacidad resistente. Se utilizan para grandes cargas pudiendo llevar elementos de pretensado. La integración de PCM en el seno de estos forjados no es viable salvo embebidos en el seno del material (hormigón). La activación por aire supondría el establecimiento "in situ" de conducciones siendo complicadas de ejecutar, mediante agua parece más razonable quedando las tuberías incluidas en el forjado. La masividad del forjado supone además una inercia térmica añadida.

Ya existe experiencia real en forjados térmicamente activos, la inclusión de PCM añadiría una ventaja adicional, salvando las precauciones necesarias que lo hagan compatible.

**Forjados reticulares:** Los forjados reticulares son losas de hormigón armado, no homogéneas, aligeradas y armadas en dos direcciones ortogonales formando una placa nervada. Los aligeramientos se realizan mediante casetones (moldes recuperables) o mediante elementos perdidos que quedan incluidos en el forjado: casetones de hormigón, EPS, etc.



Figura 6.7: Forjado reticular. Imagen: Andece

En los forjados reticulares se prescinde del aligeramiento en las zonas próximas a los pilares macizándose. La separación entre los nervios (intereje) suele ser de 80 cm.

La inclusión de elementos PCM en este tipo de forjados es más compleja. La activación del PCM por aire requiere de aberturas entre los huecos del forjado atravesando los nervios, que no siendo imposible, empeoraría el comportamiento estructural bidireccional del mismo. En este tipo de forjados sería más viable la activación por agua, quedando al igual que para las losas las tuberías embebidas en el hormigón.

En este tipo de elementos sería interesante valorar la posibilidad de congelar el PCM en un sistema externo e inyectarlo congelado, en elementos diseñados para ello. Al descongelarse el material se podría recoger fácilmente en estado líquido.

En general se puede afirmar que la integración de elementos PCM en forjados unidireccionales (industrializados o no) es sencilla utilizándose el espacio que ocupan los aligeramientos. Las dificultades constructivas en los

puntos singulares es salvable. Para forjados en losa siempre además existe la posibilidad de disponer los elementos PCM en la parte inferior del forjado, aprovechando espacios de menos altura libre de los edificios, pasillos, distribuidores, baños, cocinas, etc.

Además de todo lo anterior el PCM puede disponerse en techos descolgados, lo que requiere un estudio especial, pero es perfectamente posible. En general en este tipo de forjados los cantos pueden ser más reducidos por lo que se puede disponer de un espacio adicional.

La puesta en obra de hormigón "in situ" con mezcla de PCM supone una dificultad añadida que debe estudiarse con detalle para no poner en riesgo la seguridad estructural del elemento.

### 6.3.5. Integración de PCMs en particiones interiores

Las particiones interiores se pueden clasificar según su uso como tabaquería y elementos de separación vertical entre distintos usuarios. Las exigencias de estos elementos son bien distintas, sobre todo las acústicas. Algunos de estos elementos además tienen la función de separación entre sectores de incendio lo que conlleva unas exigencias más altas en cuanto a capacidad de carga, integridad (capacidad de impedir fugas de llamas y gases calientes) y aislamiento (capacidad de reducir la emisión calorífica), en caso de incendio.

Aunque puedan disponerse los elementos de cambio de fase en la superficie de las particiones, como ya se ha dicho, su activación está condicionada por la capacidad de ventilar suficientemente los espacios durante la noche.

Cabe usar soluciones que combinen PCM en forjados y en elementos verticales, piénsese que en general paralelamente a las fachadas siempre suelen existir elementos de partición para generar los recintos habitables.

En general pensar en dobles tabiques con PCM en su interior con cámara de aire es difícilmente viable por el consumo de espacio habitable.

### 6.3.6. Integración de PCMs en otros elementos

Existen zonas de los edificios en los que albergar elementos PCM puede resultar muy sencillo tales como:

- Espacios bajo cubierta
- falsos techos
- patinillos de instalaciones
- interior del hueco de ascensores
- suelos en contacto con el aire

Incluso se pueden generar chimeneas de ventilación construidas ad hoc para la inclusión de PCMs. Todo ello resulta una novedad en la práctica constructiva actual pero no lo será tanto cuando se pretenda alcanzar edificios de consumo casi nulo como se demanda desde las directivas europeas.

## 6.4. Viabilidad técnica

Como se ha dicho anteriormente el uso de PCMs en construcción de edificios no será posible si no es técnicamente viable. El estudio de la viabilidad técnica conlleva comprobar la energía térmica capaz de suministrar el elemento, su eficiencia y a través de indicadores comprobar el funcionamiento.

No se trata en este apartado de llegar a una solución óptima ni a una tipología óptima sino a aplicar el método propuesto comprobando si es o no eficaz. Para analizar la viabilidad de soluciones se restringirá el estudio al caso de fachadas.

Se propone un análisis completo de casos de estudio a través del modelo desarrollado que da lugar a un conjunto finito de situaciones. El conjunto de fachadas que se elige trata de ser representativo de un catálogo amplio de soluciones y que intenta abarcar la posible integración de PCM en fachadas ventiladas opacas, no obstante pueden existir otros igualmente válidos. No se hace un estudio de casuística de distintos materiales.

Los sistemas de fachada considerados son consecuencia de variar las condiciones del elemento exterior y el muro interior según las combinaciones siguientes:

Elemento exterior:

- Ligero: Panel aislante
- Masivo: Prefabricado de hormigón o tipo Structura (segunda piel de ladrillo visto)

Elemento interior:

- Ligero: Panel aislante.
- Pesado con aislamiento a la cámara: Muro con aislamiento por el exterior.
- Pesado: Muro tradicional (con o sin aislamiento por el interior), fábrica de bloques o prefabricados de hormigón.

El estudio de viabilidad tiene también como objetivo probar el método en sí. No se trata de hacer un estudio de optimización sino verificar por comparación el comportamiento de un conjunto de fachadas con una composición similar. El estudio se restringe a un clima, Madrid. Se trata de buscar composiciones alternativas con una eficiencia similar.

Como puede observarse, indirectamente se pretende que este estudio basado en un modelo tipo 1 pueda dar resultados concluyentes que puedan servir como metodología para el diseño de soluciones reales tanto de obra nueva como de rehabilitación de edificios existentes.

Las soluciones resultantes de combinar elementos constructivos que presentan aislamiento hacia el interior de la cámara tendrán un comportamiento muy similar, aunque tipológicamente sean muy diferentes.

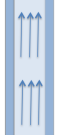
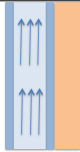
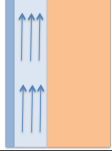
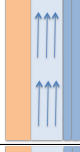
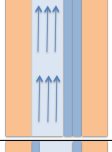
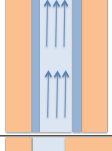
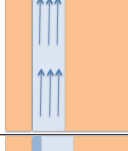
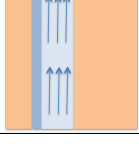
Los casos de estudio son los resultantes de la combinación de variables para las fachadas consideradas y los climas elegidos. Las fachadas resultantes son las indicadas en la tabla 6.1.

#### 6.4.1. Viabilidad técnica en fachadas

Para comprobar la viabilidad técnica en fachadas, como se ha dicho, se realizará una propuesta concreta de soluciones tipo de fachada alternativas con integración estructural de PCM que inicialmente se consideran igualmente válidas. El estudio se realizará para fachadas con una composición similar (excepto para el caso 7, sin aislamiento).

El procedimiento a seguir consta de las siguientes fases:

Tabla 6.1: Estudio de casos de fachada con PCM

Casos	Esquema	Descripción
Caso 1	ext  int	Elemento exterior ligero, elemento interior ligero
Caso 2	ext  int	Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara
Caso 3	ext  int	Elemento exterior ligero, muro interior masivo
Caso 4	ext  int	Elemento exterior masivo, elemento interior ligero
Caso 5	ext  int	Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara
Caso 6	ext  int	Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara
Caso 7	ext  int	Elemento exterior masivo, muro interior masivo
Caso 8	ext  int	Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo



- Elección de composición de la fachada para distintos tipos.
- Simulación del comportamiento para distintas cantidades de PCM y distintas velocidades.
- Simulación para la comparación del funcionamiento en distintos climas.
- Comprobación de indicadores:  $E_{Carga}$ ,  $E_{Descarga}$ , Eficiencia y factores.
- Análisis del comportamiento como intercambiado regenerativo.
- Simulación del caso para el año completo.
- Verificación de indicadores.
- Obtención de resultados, análisis y establecimiento de conclusiones.

Para el análisis del comportamiento de las fachadas para distintas cantidades de PCM se toma como clima de referencia el de Madrid durante los meses de julio y agosto, meses en los que se producen mayores descargas. La cantidad de PCM variable estará comprendida desde  $30 \text{ kg/m}^2$  a  $60 \text{ kg/m}^2$ .

Se elige para la simulación en función del clima los seis estudiados con severidad climática de verano creciente: Cuenca, Madrid, Lleida, Granada, Cáceres y Sevilla. En esta simulación la composición de las fachadas será idéntica y la cantidad de PCM de  $60 \text{ kg/m}^2$ . Igualmente se hará una simulación de todas ellas de año completo para Madrid.

Los resultados se expresarán gráficamente en función del parámetro  $\Lambda$  definido en el apartado 5.3.2.2, ecuación 4.153.

### 6.4.2. Estudio de casos

Los resultados obtenidos muestran unas diferencias claras de funcionamiento de las distintas fachadas estudiadas. No se puede afirmar que ningún sistema deba ser rechazado, aunque como se verá en la discusión siguiente el elemento exterior es conveniente que esté aislado para mejorar la eficiencia de la fachada. Además debe tenerse en cuenta que los edificios según su uso tienen asociadas distinta demanda y distintos perfiles de uso.

A continuación se recoge un breve análisis resumen de los resultados obtenidos. Los datos completos figuran en el Apéndice A.2.

#### 6.4.2.1. Caso 1. Elemento exterior ligero, elemento interior ligero

La fachada ligera de doble hoja resulta muy sencilla de industrializar por lo que podría ser de interés en muchos tipos edificatorios. Al ser poco masiva presenta una inercia térmica reducida.

Como se puede ver de los resultados obtenidos, la fachada requiere un mínimo de cantidad de PCM (para el clima dado) para funcionar correctamente. En el caso analizado debe ser más de  $50 \text{ kg/m}^2$ . Para valores inferiores el factor de utilización queda muy por debajo de la unidad, el factor de equilibrio que indica pérdidas en estos casos muestra un valor superior lo que significaría que se producen excesivas pérdidas en periodos de descarga y que no se aprovecha toda la capacidad debida al clima en la carga. El sistema podría descargar más de lo que carga.

La cantidad de energía que es capaz de proporcionar el sistema es muy alta.  $E_{Descarga}$  proporciona fácilmente valores superiores a  $60 \text{ kWh/m}^2$  durante los meses de julio y agosto e incluso llegando a  $100 \text{ kWh/m}^2$ , eso sí con eficiencias peores.

Un factor de ventilación alto, entre 0,6 y 0,7 y un efecto cámara también alto resaltan el comportamiento correcto de la fachada como almacén energético y estabilización térmica.

La Eficiencia Global para rangos normales de velocidad y medios de PCM de alrededor de 10 indica un correcto comportamiento como máquina térmica.

El funcionamiento como intercambiador regenerativo sigue el modelo estudiado para este tipo de fachadas.

Esta fachada responde muy bien a distintos climas de forma bastante homogénea sólo hay que ver el comportamiento en cuanto a la eficiencia global.

#### 6.4.2.2. Caso 2. Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara

Esta tipología sería una variante de las fachadas ventiladas tradicionales y sería válida en la rehabilitación de edificios existentes. Aunque tipológicamente no tenga nada que ver con el anterior tipo el comportamiento es idéntico.

La diferencia en cuanto a comportamiento radicaría en la inercia que supone el elemento interior de fábrica frente al elemento sin masa del tipo 1. Este aspecto se ve en el efecto cámara que es mayor en el caso primero que en este segundo.

El resto del análisis sería igual al del caso anterior.

#### **6.4.2.3. Caso 3. Elemento exterior ligero, muro interior masivo**

La fachada agrupa distintas tipologías. El muro interior podría ser desde una única hoja (bloque cerámico aligerado, bloque de hormigón) o varias, por ejemplo medio pie de ladrillo, aislamiento y trasdosado. Sería una variante del anterior sin aislamiento.

Esta solución es muy interesante de cara a la rehabilitación de edificios. La simulación además persigue el objetivo de comprobar su comportamiento y ver la influencia de la cámara.

Como se puede ver de los resultados obtenidos, la fachada funciona correctamente a partir de  $40 \text{ kg/m}^2$ . Su comportamiento es totalmente análogo a los casos anteriores, salvo en el efecto cámara. El factor del efecto cámara se hace dependiente de la velocidad. Para velocidades bajas se estabiliza creciendo para velocidades altas. Esto indica que en verano el edificio refrigera a través de la cámara, más cuanto más ventilado esté.

En cualquier caso este efecto es de segundo orden respecto a la ventilación. Véase que no se producen prácticamente diferencias en cuanto a la eficiencia global de la fachada.

#### **6.4.2.4. Caso 4. Elemento exterior masivo, elemento interior ligero**

La fachada correspondería con una de tipo industrializado pesado (paneles) o con un muro cortina de fábrica exterior. Este modelo se ajusta a un tipo de fachada innovadora (tipo Structura).

La fachada Structura es un muro exterior de fábrica que está conectado con el edificio a través de unos elementos metálicos que transmiten las accio-

nes horizontales impidiendo el movimiento de la hoja en esta dirección. La solución que se plantea en este caso presenta gran cantidad de aislamiento al interior con poca inercia.

La fachada requiere un mínimo de cantidad de PCM para funcionar correctamente. En el caso analizado debe ser más de  $40 \text{ kg/m}^2$ . La cantidad de energía que es capaz de proporcionar el sistema sigue siendo muy alta  $E_{\text{Descarga}}$  proporciona igualmente valores superiores a  $60 \text{ kWh/m}^2$  durante los meses de julio y agosto e incluso llegando también a  $100 \text{ kWh/m}^2$ .

El factor de carga real desciende respecto a las soluciones de elemento exterior ligero, lo que indica un peor comportamiento en carga lo que sin duda viene dado por tener que enfriar el elemento exterior. Aun así para el caso analizado el comportamiento sería bastante bueno.

El factor de ventilación es alto, entre 0,6 y 0,7, sin embargo el factor del efecto cámara disminuye, lo que es lógico debido al aislamiento interior.

La Eficiencia Global para rangos normales de velocidad y cantidades de PCM medias y altas es de más de 10 lo que indica un correcto comportamiento.

El funcionamiento como intercambiador regenerativo sigue indicando un comportamiento totalmente distinto de carga y descarga.

La fachada responde muy bien a distintos climas de forma bastante homogénea, la dependencia con el clima es algo mayor, pero el comportamiento global es muy similar al de las soluciones ligeras.

#### **6.4.2.5. Caso 5. Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara**

Esta fachada sería análoga al caso anterior pero más habitual desde el punto de vista de la construcción tradicional. En caso de rehabilitación consistiría en una solución SATE y una doble piel pesada.

Al igual a como ocurría entre los casos 1 y 2 el comportamiento es idéntico desde el punto de vista de la fachada. Al estar muy aislado hacia el interior el efecto cámara es prácticamente despreciable.

#### **6.4.2.6. Caso 6. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara**

La fachada es análoga a la del caso 4 y 5 en cuanto a nivel de aislamiento. La diferencia fundamental está en la disposición del aislante. Igualmente puede ser una solución de gran interés en rehabilitación.

Sería muy similar a las fachadas ventiladas tradicionales excepto en el ancho de la cámara y la disposición del aislante. El comportamiento se asemeja mucho al del primer caso, la cámara funciona con menores pérdidas y con mayores cantidades de PCM.

Sin embargo se observa una mejora de la eficiencia global ya que se producen mayores descargas con menores cargas. El efecto cámara es similar al del caso primero analizado. El funcionamiento como intercambiador regenerativo es más homogéneo. La fachada responde muy bien a distintos climas mejorando en todos ellos.

#### **6.4.2.7. Caso 7. Elemento exterior masivo, muro interior masivo**

Esta tipología se analiza para comprobar el comportamiento de fábricas existentes con una segunda piel masiva sin aislamiento. Correspondería con una fachada prefabricada o tipo Structura, similar a las anteriores. El muro interior se corresponde con una única hoja o varias al igual que el caso 3. Esta solución no conlleva aislamiento.

En comparación con los casos anteriores el comportamiento es algo peor en cuanto a eficiencia global, pero menos de lo que se podría pensar. Las cargas necesarias son mayores y menores las descargas, es decir existen mayores pérdidas. El efecto de la cámara es más significativo.

Debe notarse que la fachada se está analizando desde el punto de vista de la refrigeración. El comportamiento invernal será significativamente peor.

#### **6.4.2.8. Caso 8. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo**

Esta tipología se analiza como una variedad de la anterior para comprobar la mejora del comportamiento de la cámara si se aísla el muro exterior

por el interior de la cámara.

Es evidente la mejora en todos los aspectos. Además se adapta mejor a los climas analizados. Como puede apreciarse no requiere una mínima cantidad de PCM para desarrollarse.

### 6.4.3. Casos año completo

Para las fachadas analizadas se realiza complementariamente la simulación para un año completo con el fin de estudiar el comportamiento también en invierno.

Para esta simulación se escoge como velocidad de carga y descarga  $3, 5 \text{ m/s}$ . Como se indicó anteriormente, la cantidad de PCM será igual en todos de  $60 \text{ kg/m}^2$ . El clima analizado es el de Madrid.

Las condiciones operacionales son las indicadas en la descripción del modelo, apartado 4.4.2. Es habitual considerar como estación fría (invierno) los meses comprendidos entre noviembre y abril. Como el clima analizado es el de Madrid, es muy raro que en octubre y mayo exista necesidad de refrigeración, al menos en vivienda. El modelo tomará estos meses como si se tratara de una estación fría.

#### 6.4.3.1. Carga invernal

Lo primero que se analiza es si resulta conveniente la carga invernal en este tipo de sistemas. Es decir si compensa activar los sistemas de ventilación para elevar la temperatura de la cámara en la estación invernal en las horas de temperaturas más altas.

Para responder a esta pregunta se analizan dos fachadas, la tipo 1 y la tipo 7. En estas dos fachadas el efecto cámara es importante, la primera por dividir el aislamiento térmico en el exterior e interior e interior de la cámara y la segunda por ser la más masiva. Es claro que el PCM va a funcionar en régimen sensible, es decir la temperatura no llegará a ser la de cambio de fase.

La carga invernal significa activar la ventilación de la cámara en las horas en que la temperatura exterior en invierno sea superior al que registra la



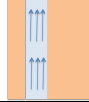
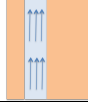
cámara. Se establece un mínimo de 15 °C.

Si se simulan ambas fachadas con y sin carga invernal, se observa que la temperatura de la cámara varía ligeramente, como era de prever. El número de horas de carga pasa de 672 a 827 en el caso de la fachada tipo 1 y de 673 a 952 en la tipo 7.

Debido a la carga invernal la energía  $E_C$  correspondiente al efecto cámara pasa de ser de 25,19 a 27,5 en el caso 1 y de 21,35 a 23,27 en el caso 2; valores en ( $kW \cdot h/m^2$ ). Para ello se necesita un consumo de ventiladores en carga que pasa de 8,89 a 10,93 en el caso 1 y de 9,25 a 12,92 en el caso 2; valores en ( $kW \cdot h/m^2$ ). La Eficiencia Global Fachada ( $\varepsilon_{GF}$ ) disminuye en ambos casos de 10,38 a 9,26 en el primero y de 10,32 a 8,39 en el segundo.

Por lo tanto se puede afirmar que para las fachadas analizadas y con las condiciones establecidas la carga invernal no es rentable desde el punto de vista energético. Valores recogidos en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Estudio de casos de fachada con carga invernal. Año completo

Casos	Caso 1 	Caso 1 carga in- vernal 	Caso 7 	Caso 7 carga in- vernal 
Periodos carga	122	179	123	211
Horas carga	672	827	673	952
Periodos descarga	104	104	104	104
Horas descarga	449	449	441	441
Horas parado	1803	1802	1784	1784
Horas sobrecalentamiento	4	4	30	30
$E_{Carga} (kW \cdot h/m^2)$	142.02	142.86	144.28	145.24
$E_{Descarga} (kW \cdot h/m^2)$	-128.49	-128.49	-133.92	-133.92
$E_C$ $E_{efecto\ cámara}$ ( $kW \cdot h/m^2$ )	25.19	27.5	21.35	23.27
$C_{vent}$ Carga ( $kW \cdot h/m^2$ )	8.89	10.93	9.25	12.92
$C_{vent}$ Descarga ( $kW \cdot h/m^2$ )	5.91	5.91	5.8	5.8
Eficiencia Global Fachada ( $\varepsilon_{GF}$ ): $f_D \cdot \frac{f_V + f_C}{f_U}$	10.38	9.26	10.32	8.39



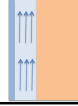
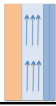
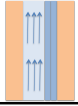
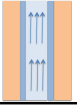
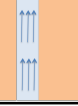
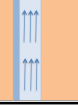
Se muestra gráficamente el comportamiento de las cuatro fachadas analizadas. Las estrellas muestran los momentos de carga. En estos gráficos se nota claramente el efecto de la masa térmica que supone la fábrica, en el

periodo invernal la temperatura fluctúa mucho más que el caso de la fachada ligera. Figura 6.8.

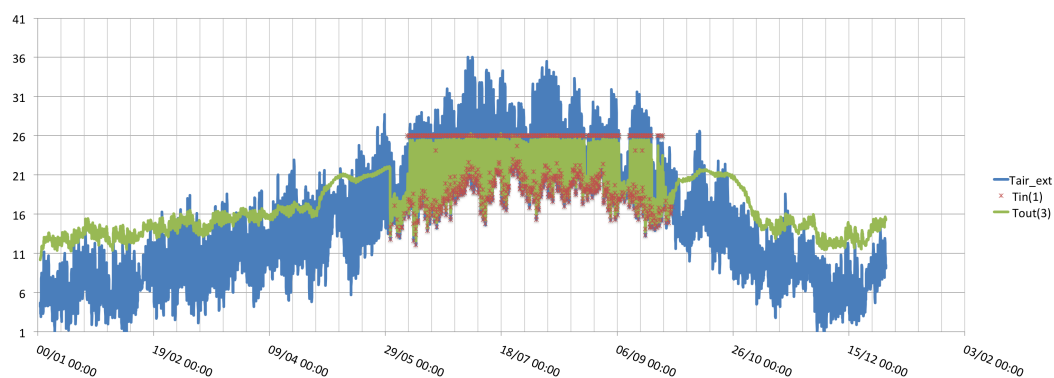
#### 6.4.3.2. Estudio de tipos de fachada

Se estudian para año completo, clima de Madrid y en las condiciones ya mencionadas. En la tabla 6.3 se recogen los resultados obtenidos más importantes.

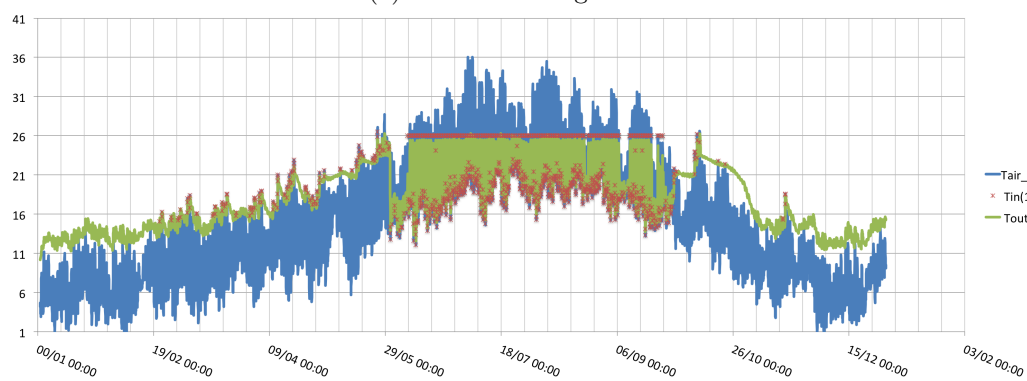
Tabla 6.3: Estudio de casos de fachada año completo. Valores globales

Casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
								
Periodos carga	122	121	123	123	123	123	123	123
Horas carga	672	664	682	645	655	655	673	674
Periodos descarga	104	104	104	104	104	104	104	104
Horas descarga	449	450	455	441	441	461	441	462
Horas parado	1803	1812	1791	1811	1804	1800	1784	1785
Horas sobrecalentamiento	4	2	0	31	28	12	30	7
$E_{Diseño\ carga} (kW \cdot h/m^2)$	1.69	1.69	1.76	1.78	1.78	1.69	1.85	1.76
$E_{Descarga} (kW \cdot h/m^2)$	-128.49	-129.18	-131.87	-132.83	-133.16	-140.31	-133.92	-142.57
$E_{máx.Descarga} (kW \cdot h/m^2)$	-140.51	-140.9	-143.61	-146.5	-146.63	-143.72	-147.85	-146.35
$E_{Carga} (kW \cdot h/m^2)$	142.02	141.53	148.52	133.35	133.25	133.08	144.28	141.59
$E_{máx.Carga} (kW \cdot h/m^2)$	173.46	171.78	180.69	183.91	183.99	175.72	189.68	181.5
$E_C$ $E_{efecto\ cámara}$ ( $kW \cdot h/m^2$ )	25.19	19.99	36.65	4.04	3.28	23.01	21.35	41.57
$C_{vent\ Carga}$	8.89	8.76	8.97	8.89	8.99	8.78	9.25	8.96
$C_{vent\ Descarga}$	5.91	5.92	5.99	5.8	5.8	6.07	5.8	6.08
$f_U$ , factor de utilización: $\frac{E_{Descarga}}{E_{máx.Descarga}}$	0.91	0.92	0.92	0.91	0.91	0.98	0.9	0.97
$f_E$ , factor de equilibrio: $\frac{E_{máx.Descarga}}{E_{Carga}}$	0.99	1	0.97	1.1	1.1	1.08	1.03	1.04
$f_{Cr}$ , factor de carga real: $\frac{E_{Carga}}{E_{máx.Carga}}$	0.82	0.82	0.82	0.73	0.73	0.76	0.76	0.78
$f_{Cd}$ , factor de carga de diseño: $\frac{E_{máx.Carga}}{E_{Diseño\ carga}}$	0.84	0.84	0.83	0.84	0.84	0.85	0.83	0.84
$f_V$ , factor de ventilación: $\frac{E_{Descarga}}{E_{Diseño\ carga}}$	0.62	0.63	0.61	0.61	0.61	0.68	0.59	0.66
$f_C$ , factor del efecto cámara: $\frac{E_C}{E_{Diseño\ carga}}$	0.12	0.1	0.17	0.02	0.02	0.11	0.09	0.19
$f_I$ , factor de instalación: $\frac{C_{vent}}{C_{Diseño\ vent}}$	0.54	0.54	0.54	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55
$f_D$ , factor de diseño: $\frac{E_{Diseño\ carga}}{C_{Diseño\ vent}}$	7.54	7.54	7.87	7.95	7.95	7.54	8.28	7.87
Eficiencia Global Fachada $\varepsilon_{GF}: f_D \cdot \frac{f_V + f_C}{f_I}$	10.38	10.16	11.26	9.31	9.23	11	10.32	12.24

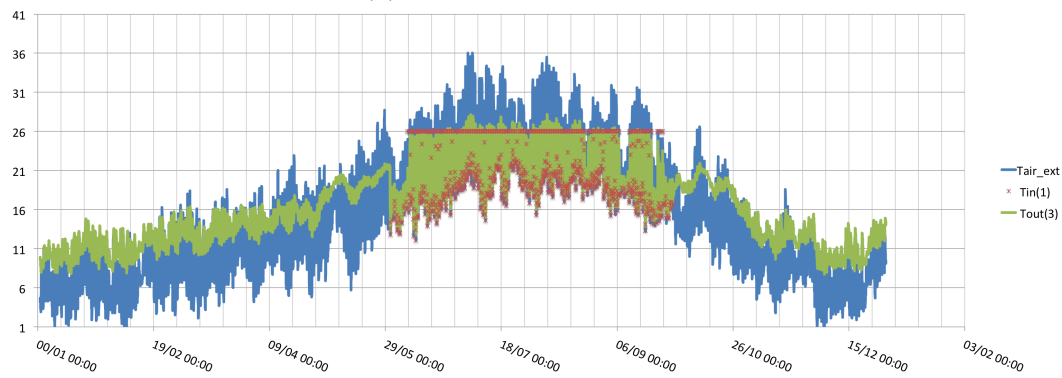




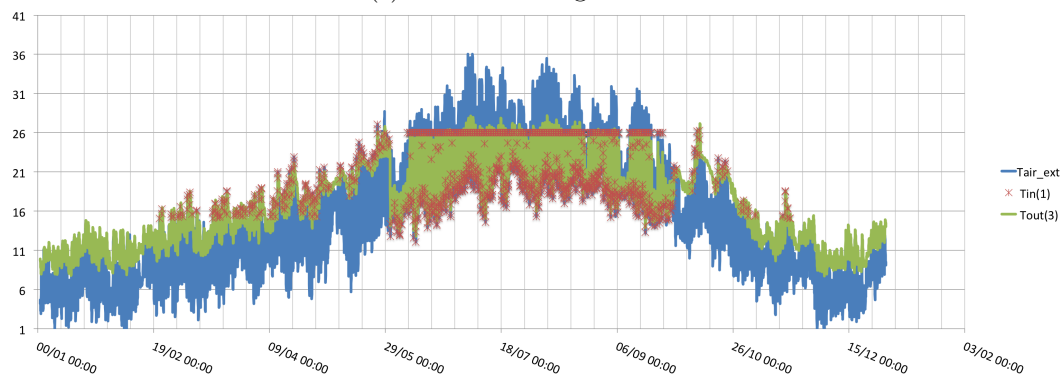
(a) Caso 1 sin carga invernal



(b) Caso 1 con carga invernal



(c) Caso 7 sin carga invernal



(d) Caso 7 con carga invernal

Figura 6.8: Gráficos de temperaturas horarias de año completo con y sin carga invernal

Analizando los resultados obtenidos se puede decir que todas las fachadas tienen un comportamiento excelente. Bajo las condiciones establecidas requieren entre 650 y 675 horas de carga, pudiendo descargar alrededor de 450 horas una energía media de 130 ( $kW \cdot h/m^2$ ) referido a  $m^2$  de fachada.

El factor de utilización  $f_U$  es alto cercano a la unidad, lo que indica una descarga correcta lo que se corresponde con la velocidad del aire de 3,5  $m/s$ .

El factor de equilibrio  $f_E$  es también cercano a la unidad. En las fachadas con piel exterior pesada supera ligeramente la unidad debido a la mayor capacidad de descarga frente a la carga por la inercia suplementaria. Un valor tan alto en general indica pocas pérdidas. Esto también se ve por lo equilibradas que están carga y descarga.

En este punto hay que añadir que los elementos pesados en el exterior disipan calor por sí mismos, lo que supone una refrigeración añadida. Este aspecto se nota en menores tiempos de carga, las fachadas tipo 6 y 8 cargan menos y descargan más. Por contra producen más horas de sobrecalentamiento, sobre todo las que no están aisladas hacia la cámara. Por otra parte son menos estables en el clima invernal.

El factor de carga real  $f_{Cr}$  presenta diferencias entre las distintas fachadas en función de cómo esté de confinado y aislado el material de cambio de fase. El valor aumenta del entorno de 0,75 a 0,82. La diferencia no es muy alta pero apreciable. Todas ellas tienen un buen comportamiento en carga, si cabe mejor las ligeras.

El factor de carga de diseño  $f_{Cd}$  es muy similar en todas dado que tienen unas características muy parecidas. Indica una carga apreciable para esta cantidad de PCM, que incluso se podría rebajar.

El factor de ventilación  $f_V$  supera el valor de 0,60 en todos los casos. Esto indica el buen comportamiento de la ventilación para las fachadas analizadas. Si se quisiera aumentar se podría ajustar a la baja la cantidad de PCM, para esta velocidad.

El factor del efecto cámara  $f_C$  es apreciablemente alto excepto en las fachadas muy aisladas hacia el interior. Nótese que la energía debida al efecto cámara está entre 20 y 40 ( $kW \cdot h/m^2$ ), frente a 3,3 a 4 ( $kW \cdot h/m^2$ ), en los

casos muy aislados hacia el interior. Lo anterior indica claramente que la cámara cobrará menor importancia en estos casos. Este factor es bueno para invierno, pero un inconveniente para el verano, el edificio disipará peor.

El factor de instalación  $f_I$ , es muy estable de alrededor de 0,50. Estable por ser las cargas y descargas de similar duración en todas las fachadas. El funcionamiento no abarca el periodo total establecido en el diseño, carga de 23 a 9 horas y descarga de 12 a 19 horas; es decir un máximo de 10 horas de carga y 7 de descarga diarias. Lo normal será de 7 horas en carga y unas cinco de descarga. En los días más calurosos sí se llega al máximo permitido.

El factor de diseño  $f_D$  es similar en todas salvo por el hecho de presentar distinta inercia hacia el interior.

Por último la Eficiencia Global Fachada  $\varepsilon_{GF}$  está comprendida entre 9,23 y 12, 24, resultados que marcan el interés en este tipo de fachadas.

Este análisis demuestra que a través de los indicadores se puede llegar a optimizar cada uno de los sistemas de fachada para un clima dado siguiendo la metodología planteada.

Para finalizar este apartado se muestra un gráfico de las distintas fachadas que compara la energía cargada, descargada y la eficiencia conseguida. Ver figura 6.9.

## 6.5. Viabilidad económica

El estudio de viabilidad económica que se propone tiene como finalidad la obtención de un orden de magnitud de la capitalización de la energía que proporciona el sistema en comparación con el coste de la incorporación del PCM.

Recientemente se han realizado por todos los estados miembro de la Unión Europea un conjunto de estudios para comprobar el grado de adecuación de los reglamentos energéticos a la Directiva 2010/31/EU. Los estudios se basan en una metodología común (reglamento delegado N 244/2012 de 16 de enero de 2012) donde se fija el marco bajo el cual se deben calcular los niveles de coste óptimo de los mínimos valores de prestaciones exigidos por cada estado a los edificios y los elementos constructivos.

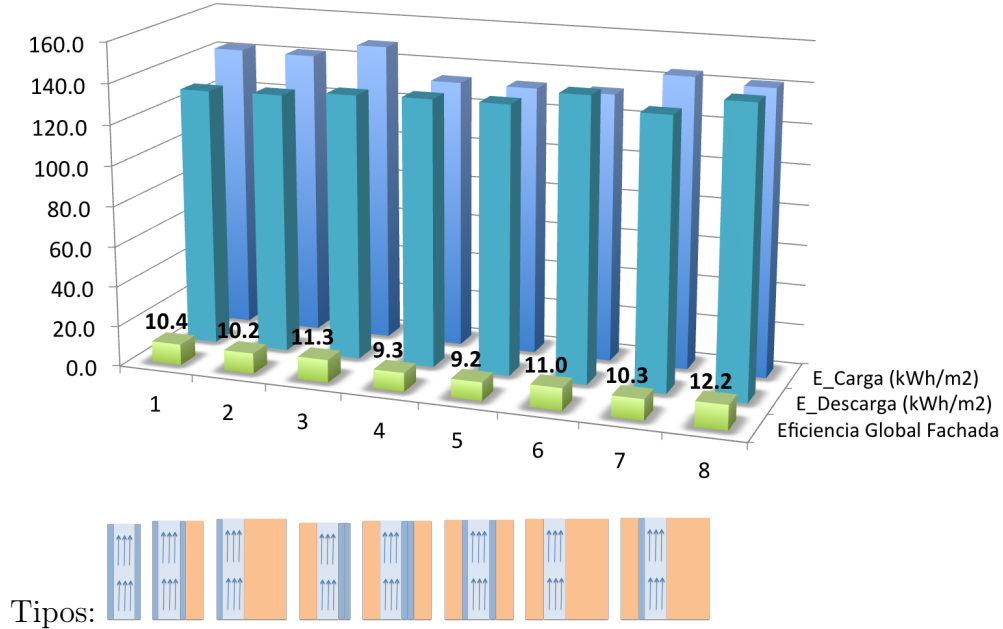


Figura 6.9: Gráfico comparativo de energías y eficiencias de casos de fachada.

Los estudios tienen dos variantes a nivel macroeconómico y a nivel microeconómico, es decir con una perspectiva financiera. Se han realizado tanto para edificios nuevos como para rehabilitación de edificios existentes. La metodología es neutra y no debe favorecer una solución tecnológica frente a otras.

Los estudios se hacen en términos de energía primaria estableciendo un conjunto de paquetes de medidas de mejora que se valoran. Los factores de conversión son los fijados a nivel nacional. Los estudios se realizan a nivel de edificio y se basan en una muestra que se considera representativa.

La formulación que se sigue para el cálculo del coste global es la indicada en la ecuación 6.1

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \cdot R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad (6.1)$$

Donde:

$\tau$  es el período de cálculo

$C_g(\tau)$  es el coste global referido al año inicial

$C_I$  es la inversión de la medida o el conjunto de medidas  $j$

$C_{a,i}(j)$  es el coste anual de la medida o conjunto de medidas  $j$  durante el año  $i$

$V_{f,\tau}(j)$  es el valor residual de la medida o del conjunto de medidas  $j$  al final del período de cálculo (descontado al valor del año inicial  $\tau_0$ )

$R_d(i)$  es un factor de actualización para el año  $i$  basada en la tasa de actualización  $r$

El factor de descuento se calcula como:

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^p \quad (6.2)$$

Donde:

$p$  es el número de años desde el período inicial y  $r$  es la tasa de actualización.

La formulación a nivel macro es similar a la anterior añadiendo el coste de las emisiones. Como diferencia importante se destaca que a nivel macroeconómico no se deben incluir los impuestos, otras cargas ni subvenciones. La tasa de actualización  $r$  se utiliza para poder comparar en diferentes momentos el valor del dinero en términos reales excluyendo la inflación. Esta tasa en la metodología propuesta por la Comisión incluye el coste del capital. Los estados miembro deben determinar la tasa de descuento haciendo al menos dos supuestos como análisis de sensibilidad.

La Comisión sugiere para el cálculo macroeconómico un valor del 4%. En el caso español se tomaron diferentes valores para los edificios nuevos y existentes y para los análisis macro y financiero. A nivel macro se tomaron valores del 3% y 4%, a nivel financiero 7% para edificios nuevos y 6%, 10% y 14% para rehabilitación de edificios existentes. Esta formulación está pensada para utilizarse a nivel de edificio, no de elemento constructivo o de medida de mejora concreta.

Utilizar este método como evaluación de la viabilidad económica requeriría tomar una muestra de edificios de nueva construcción que fueran representativos (unifamiliares, bloques y edificios no residenciales) y otro conjunto representativo del parque existente y establecer para cada solución un catálogo de medidas combinadas con la tecnología de almacenamiento de cambio de fase (tratamiento de puentes térmicos, estanqueidad y ventilación, control solar), un conjunto de medidas sobre instalaciones y simular el comportamiento en distintos climas. Sería preciso incorporar el modelo desarrollado en los programas de simulación energética dado que el cálculo se realiza a nivel de edificio. Con este cálculo se comprobaría la eficacia de este sistema frente a otros sistemas.

Alternativamente para el cálculo de viabilidad a nivel de edificio se podría usar el modelo propuesto por CEN. En el momento actual está en desarrollo la norma prEN 16627. "Sustainability of construction works - Assessment of economic performance of buildings - Calculation method". Esta norma basa el análisis económico también a nivel de edificio. Esta metodología requiere conocer todas las entradas y salidas del sistema, costes iniciales, construcción, mantenimiento, reposición, etc. La norma se basa en el valor actual neto y admite también hacerlo solo en costes, tal y como lo hace la metodología de la comisión. El método es complejo y requiere gran cantidad de información.

Conforme con el objetivo planteado se restringirá el estudio a nivel de solución constructiva, calculándose el sobrecoste inicial máximo aproximado que puede hacer rentable la tecnología desde el punto de vista económico. Se opta por este desarrollo para obtener de forma sencilla pero eficaz un orden de magnitud.

De hecho un complejo estudio a nivel de edificio excedería las necesidades iniciales y no reportaría mucha más información en cuanto a la integración del PCM. El grado de definición necesario en cuanto a tipos edificatorios requeriría hacer un dimensionado de sistemas diferente para cada tipo y uso, es decir habría que personalizar el cálculo para cada solución diferente, entendiendo por solución no sólo la definición constructiva y la instalación sino la cantidad de material de cambio de fase a incluir en función de las necesidades. Cualquier alternativa parcial en cuanto a casos, en principio, no sería relevante para demostrar con carácter general si las soluciones son viables o no.

Este análisis se considera puede ser válido para cualquier sistema y se

aplicará al de la fachada desacoplado, salvando así el obstáculo del necesario acoplamiento entre los sistemas de almacenamiento estructural con cambio de fase y los modelos de cálculo a nivel de edificio.

El estudio simplificado se basa en calcular el valor actual neto (VAN) aplicado al sobrecoste de la incorporación del PCM. El VAN se define como:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad (6.3)$$

Donde:

$V_t$  representa los flujos de caja en cada periodo  $t$

$I_0$  representa la inversión inicial

$n$  representa el número de periodos considerado

$k$  es el tipo de interés

Si el VAN toma el valor nulo el interés  $k$  pasa a llamarse Tasa Interna de Retorno (TIR) que proporciona la rentabilidad del elemento en el periodo considerado.

Se atenderá a las siguientes consideraciones:

Sólo se obtendrá retorno de la ventilación, es decir de  $E_{Descarga}$ . Como se ha visto el efecto de la cámara tiene una importancia menor, el aislamiento en sí tiene una repercusión muy superior. Además la incorporación de PCM al caso de fachada no tiene porque cubrir toda su superficie. En general la relación entre el área de fachada y la superficie construida varía mucho de unos edificios a otros.

En el caso de una vivienda unifamiliar aislada se pueden encontrar relaciones de 2 a 1 entre la superficie de fachada frente a los metros cuadrados contruidos, en caso de viviendas pareadas esta relación puede ser 0,90, 0,80 en bloques y 0,50 para edificios entre medianeras. Igualmente no se tendrá en cuenta el porcentaje de huecos que en caso de viviendas unifamiliares aisladas supone un 22 %, que puede llegar a ser del 40 % en caso de pareadas. Para bloques la tendencia es similar 22 % para caso de bloque aislado, 30 % manzana cerrada y 40 % entre medianeras. El cálculo se realiza pues en relación con respecto a metros cuadrados de fachada con PCM, excluidos huecos.

El periodo de cálculo podría considerarse de 20 años en edificios no residenciales, 30 años en residenciales y 50 años de vida útil total. Realizar un cálculo económico a más de 20 años no resulta eficaz puesto que no sería admisible en la elección de la solución. Si se trata de justificar un sobrecoste el periodo de retorno no puede ser muy alto para aceptarse como válido.

El precio de la energía (electricidad) se tomará igual  $0,44 \text{ €/kWh}$ , con un incremento anual del 1,5 %. Este valor puede parecer alto. El precio de la tarifa de último recurso publicada en el BOE de 1 de octubre de 2013 modalidad sin discriminación horaria establece un precio de  $TEU_0=0,130485 \text{ €/kWh}$  al que se suma un término fijo de  $0,09767 \text{ €/kWh día}$ , hay que añadir un impuesto del 4,864 % y el IVA del 21 % además del alquiler de contador. El valor de  $0,44 \text{ €/kWh}$  es conservador ya que se ha calculado para un consumo de  $50 \text{ kWh}$  de consumo mensual con contrato de  $3,45 \text{ kW}$  (mínimo). Se incluye el coste de alquiler de contador de  $0,027616 \text{ €/día}$ .

Para determinadas tipologías de edificios (edificios representativos) es habitual el uso de fachadas ventiladas, parcialmente vidriadas o incluso fachadas acristaladas (ligeras en general), no en caso de viviendas debido a su mayor coste. En rehabilitación, la ejecución de una segunda piel como fachada ventilada es de las intervenciones más caras. El coste final de un sistema tipo SATE puede rondar actualmente de  $40 \text{ a } 50 \text{ €/m}^2$  de fachada, frente a más de  $100 \text{ a } 120 \text{ €/m}^2$  de una fachada ventilada.

No hace falta hacer cálculos para darse cuenta de que la decisión de prescribir una solución de este tipo no puede venir dada por el ahorro que proporciona en refrigeración. Estas soluciones son difícilmente amortizables mediante el ahorro energético que proporcionan tanto en calefacción como en refrigeración y la capitalización de este ahorro. No obstante pueden existir otras razones que lleven a la elección de este tipo de fachadas tanto en edificios nuevos como en existentes. Como se ha dicho en el estudio se tratará de amortizar tan sólo el sobrecoste.

El precio del material de cambio de fase es muy variable entre  $1 \text{ €/kg}$ , hasta  $10 \text{ €/kg}$ . Es obvio que este factor es realmente el condicionante para que el sistema sea viable. En el cálculo se hará variar este precio entre  $1 \text{ €/kg}$  y  $3,5 \text{ €/kg}$ . Se considera un ratio de  $60 \text{ kg/m}^2$  de fachada al precio indicado a lo que se añadirá  $20 \text{ €/m}^2$  (de fachada igualmente) para cubrir los aspectos de puesta en obra y de repercusión de ventiladores.

De los estudios anteriores se considera que un valor de  $E_{Descarga}$  en el



entorno de  $130 \text{ kWh/m}^2$  de fachada puede considerarse alto. Este metro cuadrado de superficie de fachada podría combatir la demanda de refrigeración de unos  $7 \text{ m}^2$  de superficie en planta en caso de vivienda. Para calcular el ahorro se comparará con una máquina térmica con un COP de 3. Para obtener la energía de descarga se considera un consumo asociado medio de ventiladores de  $15 \text{ kWh/m}^2$ .

En la tabla 6.4 se recoge el resultado de calcular los valores de VAN y TIR de la solución descrita anteriormente.

Tabla 6.4: Cálculo de viabilidad económica de fachada con PCM. VAN y TIR

Tipo de interés: $k=4\%$						
Precio del PCM (€/kg)	1	1,5	2	2,5	3	3,5
VAN 10 años	30.78 €	21.16 €	-7.68 €	-36.53 €	-65.37 €	-94.22 €
VAN 20 años	115.22 €	105.60 €	76.76 €	47.91 €	19.07 €	-9.78 €
Tipo de interés: $k=5\%$						
Precio del PCM (€/kg)	1	1,5	2	2,5	3	3,5
VAN 10 años	26.22€	16.70€	-11.87 €	-40.44 €	-69.01€	-97.59 €
VAN 20 años	99.19 €	89.67 €	61.10 €	32.53 €	3.95 €	-24.62 €
Tipo de interés: $k=7\%$						
Precio del PCM (€/kg)	1	1,5	2	2,5	3	3,5
VAN 10 años	18.18 €	8.83 €	-19.21 €	-47.24 €	-75.28 €	-103.32 €
VAN 20 años	73.01 €	63.66 €	35.63 €	7.59 €	-20.45 €	-48.49 €
Tipo de interés: $k=10\%$						
Precio del PCM (€/kg)	1	1,5	2	2,5	3	3,5
VAN 10 años	8.32 €	-0.78 €	-28.05 €	-55.32 €	-82.59 €	-109.87 €
VAN 20 años	44.58 €	35.49 €	8.21 €	-19.06 €	-46.33 €	-73.61 €
TASA INTERNA DE RETORNO						
Precio del PCM (€/kg)	1	1,5	2	2,5	3	3,5
TIR 10 años	13.2 %	9.7 %	2.4 %	-2.4 %	-6.0 %	-8.7 %
TIR 20 años	19.4 %	16.7 %	11.2 %	7.7 %	5.3 %	3.4 %

De los resultados obtenidos se desprende que en obra nueva puede ser económicamente rentable llegar hasta precios de PCM superiores a 3 €/kg. Aunque los valores de VAN son negativos en principio serían inferiores al coste promediado de las instalaciones de refrigeración. Un TIR a 20 años cercano a 4 lo hace inviable, como retorno, pero al ser sustitutivo del sistema supone un ahorro en sí. Además valores de este tipo serían aceptables a muy largo plazo para renovables por la repercusión positiva ambiental que supone.

A nivel financiero para poder hablar de viabilidad económica, si no hay sustitución de equipos, sino redundancia, el precio del PCM no debería llegar a 2 €/kg. Valores en torno a 1,5 €/kg proporcionan ratios de TIR cercanos a 10 a 10 años; por lo que podría usarse también en rehabilitación.

Lo anterior indica que de darse estos valores de precio en sobrecostes, lo cual es posible, el sistema sería viable económicamente tanto para obra nueva como de rehabilitación, es decir siempre y cuando no se pretenda obtener la amortización del sistema constructivo completo.

## Capítulo 7

# Discusión final y conclusiones

Se partió de la hipótesis de que el ahorro energético en edificios mediante el almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase podía ser viable tanto técnica como económicamente. Igualmente se planteaba que esta tecnología podía contribuir de forma decisiva a la reducción de la demanda energética de los edificios.

Se ha hecho un análisis del estado del arte sobre los materiales de cambio de fase y su utilización en edificación. Se han estudiado experiencias previas de integración. Se ha planteado la necesidad de conocer mejor el comportamiento de los sistemas que incorporan PCM y la necesidad de desarrollar modelos basados en métodos simplificados e indicadores que sinteticen la información. Se han estudiado y desarrollado modelos simplificados y se ha aplicado en detalle al caso de fachada ventilada con PCM. El modelo ha sido calibrado contra ensayos experimentales y contra un modelo detallado previo.

Se ha desarrollado un conjunto de indicadores de evaluación de la eficiencia y se han estudiado las variables principales que influyen en el almacenamiento de energía. Se ha estudiado el sistema de almacenamiento de cambio de fase a través de los indicadores y como intercambiador regenerativo.

Se ha estudiado la fachada como un intercambiador regenerativo lo que ha dado lugar a una posible estimación de los indicadores mediante una aproximación teórica.

Se ha estudiado y analizado la integración estructural para distintos elementos constructivos y se ha verificado, mediante un conjunto de casos, la viabilidad técnica en el caso de fachada. Igualmente se ha analizado sucintamente la viabilidad desde el punto de vista económico.

A lo largo de la tesis se ha hecho una discusión sobre los distintos aspectos tratados, por lo que a modo de ideas y muy resumidamente se incluye la siguiente discusión final, establecimiento de conclusiones y posibles líneas de investigación futura.

## 7.1. Elección de los materiales de cambio de fase

La adecuada elección de materiales para la utilización en el almacenamiento estructural es un aspecto clave para lograr un comportamiento idóneo de los sistemas.

Existen actualmente un gran número de productos susceptibles de aplicación con garantía de éxito. Para lograr este éxito debe comprobarse la adecuada compatibilidad con los elementos constructivos y el comportamiento real de los productos.

En productos inorgánicos, el hecho de que las temperaturas de solidificación y fusión no coincidan hace que al producirse la solidificación a una temperatura sensiblemente menor y al ser el rango de temperaturas de uso muy acotado, puede producir que la solidificación no sea completa en un número de ciclos importante. Debe tenerse en cuenta a la hora de escoger sales hidratadas. Este aspecto no tiene por qué ser un inconveniente.

En productos orgánicos existe el problema del comportamiento ante el fuego. Como de ha visto no es un obstáculo insalvable en edificación. Los productos o suelen estar confinados o cuando se disponen en cámaras es perfectamente posible cumplir con la reglamentación limitando éstas. Por la menor entalpía será necesaria mayor cantidad de material, por la baja conductividad mayor superficie de transferencia y más tiempo.

El encapsulado resta capacidad, por lo que se debe hacer lo posible para tener una buena transferencia, lo cual no siempre es sencillo.

Además del comportamiento el precio es un factor dominante. Este aspecto mejorará sin duda en el futuro en caso de extenderse la utilización de los PCM en construcción.

## 7.2. Integración de PCM en edificación

La integración en los elementos constructivos del edificio se ha visto que es muy variada, pudiendo ser eficaz en todos los casos si se atiende a combinar adecuadamente la sollicitación y respuesta del material. El aprovechamiento del material obliga a que se active un número de ciclos elevado lo que se debe garantizar y prever desde el proyecto.

La incorporación de PCM en los sistemas constructivos del edificio contribuye a la estabilidad térmica en general tal y como ocurre con la inercia térmica. Este aspecto es muy interesante para los sistemas constructivos ligeros, industrializados, cada vez más usados en construcción. En caso de sistemas masivos este aspecto cobra menos importancia.

Por ello, la integración superficial en paredes y techos que es de interés como medio de estabilización térmica y puede implicar un aumento de confort si está bien resuelto, puede no siempre activarse adecuadamente ni conllevar necesariamente un ahorro energético.

La inclusión de PCMs en el seno de cámaras abre la posibilidad del uso de la ventilación como medio de transporte y recuperación de la energía. Con ello se produce un efecto complementario de ventilación, mucho más potente en la transferencia que el del efecto de la existencia de la propia cámara.

La integración en fachada y por extensión en cubierta es perfectamente posible, en fachada se ha comprobado un buen comportamiento, en cubierta se han analizado ventajas y dificultades. El caso de integración en los forjados es singularmente claro por sus posibilidades. Se han analizado los distintos tipos de forjado utilizados en edificación y en casi todos ellos es susceptible la incorporación del PCM sin grandes dificultades.

En cualquier caso las soluciones integradas de PCM deben estar combinadas con la utilización de energía renovable. La utilización conjunta de distintos sistemas constructivos puede dar diseños muy interesantes, sobre todo si se plantea una doble utilización invierno, verano; o en edificios de uso distinto al residencial.

La doble posibilidad de usar el efecto cámara y el efecto ventilación pro-

porciona versatilidad a la hora de proyectar soluciones edificatorias complejas. Se debe profundizar en el conocimiento del comportamiento real mediante investigación aplicada y la ejecución de demostradores a fin de que la tecnología alcance un grado de desarrollo y madurez suficiente para su uso generalizado.

Con respecto a la fachada, el efecto de la cámara no es nada despreciable aunque como se ha visto es sensiblemente inferior al de la ventilación. En cada caso concreto de integración se debe estudiar cual es la solución idónea que deberá ser acorde con el potencial climático y las necesidades del edificio.

Se debe avanzar en el diseño de soluciones pasivas para evitar consumos de ventiladores y en sistemas de control para que las cargas energéticas se produzcan de la forma más eficientemente posible.

No se debe olvidar que el éxito en la integración dependerá del comportamiento del material, su confinamiento y la exposición en la activación.

### 7.3. Eficiencia energética en edificios con soluciones con PCM

La utilización de materiales de cambio de fase en edificación además de disminuir el consumo energético contribuye a la reducción de la demanda energética de los edificios, aspecto clave al estar limitado en la reglamentación. Para algunos edificios no es sencillo rebajar los valores de la demanda por su configuración o uso. La energía además proviene de fuentes renovables por lo que se contribuye a la reducción de emisiones de  $CO_2$  y consecuentemente a mitigar la huella de carbono.

Pero por encima de todo, la integración estructural mediante materiales de cambio de fase es eficiente desde el punto de vista energético como se ha demostrado. Los resultados obtenidos de la simulación muestran valores de la eficiencia global altos, del orden de 10 para las tipologías analizadas. La energía de descarga es también muy alta y el comportamiento de los indicadores es muy estable.

Se ha comprobado que el uso de indicadores puede servir de base para la optimización de soluciones pudiendo permitir un dimensionado estricto, lo

cual mejora considerablemente la viabilidad económica de las mismas. Téngase en cuenta que disminuir la cantidad de PCM, debido a su precio, puede hacer la tecnología económicamente viable.

En fachadas y en climas fríos siempre será aconsejable disponer del aislante en el muro interior del edificio para disminuir las pérdidas. En este caso el efecto cámara será más reducido. En climas medios disponer de la cámara permite reducir la cantidad de aislante necesario, lo que tendrá además un efecto positivo en condiciones de verano. El aislamiento del elemento exterior siempre supone menores pérdidas. Si se quiere hacer uso del frío por la tarde no quedará más remedio que la cámara esté aislada. En climas extremos con altas diferencias entre el día y noche este tipo de sistemas parece a todas luces idóneo.

En cuanto al sistema de fachada estudiado se constata que en días extremos y noches calurosas no se producirá una carga suficiente. Por ello en los edificios en los que se opte por esta tecnología como única estrategia y no existan instalaciones de refrigeración se debe estudiar el número de días de falta de bienestar. Aunque esta tecnología pueda reducir considerablemente la demanda y por tanto el consumo global, no debe olvidarse este aspecto. De hecho la cantidad de PCM y las condiciones de funcionamiento (velocidad y condiciones operacionales) deberá dimensionarse con esta premisa.

El clima es básico a la hora de definir el PCM, pero más todavía lo es la disposición del material en relación con el diseño del elemento constructivo para aprovechar con eficacia el potencial climático. Como se ha dicho se ha comprobado que el aislamiento exterior de la fachada contribuye a disminuir las pérdidas en la cámara con PCM, lo cual es lógico. Pero la ausencia de aislamiento en elementos pesados exteriores permite aprovechar la inercia térmica del elemento exterior y que la disipación de energía por la noche se realice a dos caras; el comportamiento global de este tipo de fachadas se ha demostrado bueno. Se puede avanzar en el sombreado (condicionado) de la cámara. Las posibilidades son muchas.

El potencial climático no tiene en cuenta el período de carga en el que realmente el clima proporciona un gradiente suficiente para la activación rentable del PCM en los sistemas asistidos. En este tipo de diseños para conseguir una buena eficiencia es necesario limitar al máximo el número de horas de carga. Estos diseños deben contar por tanto con mecanismos para limitar la carga a un horario determinado y además contar con una previsión de si va a hacer falta o no la refrigeración, a fin de reducir también cargas

innecesarias. Sin embargo en sistemas en los que pudiera darse la carga mediante mecanismos de ventilación natural, este factor no sería tan importante.

En cuanto al comportamiento invernal, las fachadas pesadas son menos estables y su temperatura depende más del clima. Se ha comprobado en base a los casos analizados que tratar de incrementar la temperatura de la cámara en invierno en los momentos de mayor temperatura mediante el calor del aire exterior no es rentable, lo que en principio es generalizable, al menos si es preciso el uso de ventilación.

Se debe mejorar la eficiencia en carga y en descarga mediante diseños que traten de disminuir las pérdidas, avanzar en las condiciones operacionales y en el resto de variables que influyen en la eficiencia en cada caso.

En resumen la eficiencia de los sistemas de almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase en fachada aumentará con los siguientes factores:

- Un dimensionado correcto con el PCM necesario. El aumento de la cantidad de PCM mejorará la eficiencia pero lo puede hacer inviable.
- El aislamiento del elemento exterior. A no ser que sea más ventajoso su disposición al interior. Dependerá de las particularidades del edificio y de la posición del elemento.
- La reducción del tiempo de carga y descarga. A no ser que no consuma energía o ésta provenga también de fuentes renovables.
- Igualmente la reducción de la velocidad del aire (o fluido de transporte) por los costes energéticos asociados.
- La mejora de las condiciones de transferencia y excitación del PCM. Sin una buena transferencia no hay una suficiente activación de los materiales de cambio de fase.

Para comprobar que el diseño elegido es adecuado no sólo basta una buena eficiencia global. Haciendo uso de los indicadores propuestos se podrá comprobar el funcionamiento. Para mejorar el comportamiento y la eficiencia de un sistema se debe tratar de mejorar cada uno de los indicadores a fin de verificar que en conjunto responde de la manera más equilibrada posible.

En caso de fachada para el diseño y dimensionado de un sistema con PCM, el procedimiento pasará por hacer una evaluación de las necesidades



de demanda a cubrir. En el caso de refrigeración no se trata tanto de evaluar la demanda del edificio durante el año completo, la demanda es variable día a día, sino habrá que elegir un periodo más o menos estable y corto. En función de las necesidades se determinará la energía de descarga que requeriremos al sistema. Para aumentar la energía de descarga se podrá ajustar la cantidad de PCM y la velocidad del aire (fluido de transporte). Se recomienda hacer el cálculo en función del parámetro adimensional  $\Lambda$ .

Se puede realizar un dimensionado previo haciendo uso de lo expuesto en base a intercambiadores regenerativos, estimando las variables principales.

Una vez elegido el sistema constructivo se puede comprobar el funcionamiento mediante un modelo desacoplado. Si difiere mucho del previsto podrá ser por excesivas pérdidas. En caso de falta de aislamiento e inercia del elemento exterior el factor de utilización será muy bajo,  $f_U = \frac{E_{Descarga}}{E_{máx.Descarga}}$ . En este caso el factor de equilibrio estará descompensado pudiendo tomar valores incluso superiores a la unidad,  $f_E = \frac{E_{máx.Descarga}}{E_{Carga}}$ .

Si el diseño está equilibrado en cuanto a cantidad de PCM el factor de carga real  $f_{Cr} = \frac{E_{Carga}}{E_{máx.Carga}}$  será cercano a la unidad con velocidades bajas. Tanto si este factor es mayor de uno como si rango de funcionamiento en cuanto a velocidades es muy alto, indicará que el sistema requiere mayor cantidad de material de cambio de fase, o mayor superficie de exposición con la misma cantidad de PCM.

El factor de carga de diseño proporcionará información sobre si la carga se produce según lo previsto  $f_{Cd} = \frac{E_{máx.Carga}}{E_{Diseño.carga}}$ . Poco se puede hacer para mejorarlo en un diseño y clima dados salvo aumentar la velocidad del aire lo que reduce la eficiencia.

El factor de instalación informará sobre si el funcionamiento de la ventilación es acorde al previsto.  $f_I = \frac{C_{vent}}{C_{Diseño.vent}}$ . Hay que buscar que sea lo más bajo posible. Si la velocidad elegida finalmente lo es el indicador será bajo.

El factor de diseño proporcionará un índice de la eficiencia esperada en el diseño,  $f_D = \frac{E_{Diseño.carga}}{C_{Diseño.vent}}$ , midiendo el potencial de energía renovable. Disponer ventiladores de menor potencia hará aumentar este factor pero no resolverá el problema ya que no alcanzarán a suministrar el caudal requerido. Si los ventiladores son excesivamente grandes sí se verá en el indicador.

El factor del efecto cámara informará de la influencia de la cámara como elemento de estabilización,  $f_C = \frac{E_C}{E_{Diseño\ carga}}$ . Cuanto más alto mejor, pero en climas fríos esto significa que quizá el edificio requiera un mayor aislamiento, hacia la cámara.

Este procedimiento puede servir de base para la tabulación de catálogos de soluciones de fachada, en distintos climas y orientaciones. En el modelo se ha considerado siempre la insolación de la fachada en orientación sur, lo que no siempre será así. Cuanto más protegida esté la fachada de la radiación solar, en el caso de ser un elemento de refrigeración, menores serán las pérdidas y mayor su eficiencia.

Un proyecto de edificación requiere la evaluación de la demanda energética sobre el edificio. En un futuro los programas incorporarán sin duda la posibilidad de incluir materiales de cambio de fase a través de capacidades adicionales de forma natural. Con ello se conseguirá que se puedan utilizar como medio de verificación del cumplimiento del Código Técnico de la Edificación, sección HE0, limitación del consumo energético y HE1, limitación de la demanda energética. Usar estos sistemas además permitirá mejorar la calificación energética de los edificios.

## 7.4. Líneas de investigación

En este apartado se apuntan posibles líneas de investigación sobre almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase.

Investigación sobre materiales de cambio de fase: La mejora de los materiales es siempre necesaria pero no solo en sus cuanto a las prestaciones y compatibilidad, sino también en lo relacionado con la reducción de costes para abaratar su precio.

Investigación sobre los PCMs en relación con los elementos constructivos del edificio: Es necesario conocer más sobre la compatibilidad de materiales, el comportamiento en el tiempo y la durabilidad. Comprobar la influencia en las prestaciones de los productos de construcción (hormigón, cerámicas, paneles, etc) bajo distintas situaciones y posibles integraciones (materiales embebidos y confinados); profundizar en el estudio de nuevos elementos confinadores adecuados para su inclusión en los sistemas constructivos tradicionales y nuevos elementos constructivos especialmente concebidos para incluir

el PCM.

Investigación en desarrollo de tecnología: Como tecnología innovadora necesita desarrollo para su puesta en mercado, lo que abre el estudio a nuevas investigaciones y diseños de aplicación industrial. Investigación aplicada para la generación de diseños industriales de integración en colaboración con el sector. Desarrollo de patentes y modelos de utilidad.

En este sentido queda mucho por hacer de generación de nuevas ideas de innovación y desarrollo en el uso de PCM como elemento de reducción de la demanda energética, estabilización térmica y apoyo a los sistemas de climatización del edificio. Desarrollos de soluciones innovadoras como tecnologías de enfriamiento independiente e inyección de PCM, uso de PCM como fluido de transporte. Congelación de PCM directamente pulverizándolo en gotas a contracorriente del aire. Combinación de distintos PCM en un elemento para doble uso invierno-verano, etc.

Investigación en relación con la arquitectura en la creación de nuevos diseños de soluciones adaptados a esta tecnología. Uso de PCM como mejora de invernaderos adosados, muros solares, muros Trombe y parietódinámicos. Uso del PCM como mejora de los sistemas de climatización del edificio. Uso de materiales de cambio de fase como almacén térmico en captadores solares térmicos para ACS y calefacción. Suelos radiantes con PCM, etc.

Desarrollo de modelos simplificados adaptados a casos concretos y estudios teóricos en relación con intercambiadores regenerativos. Acoplamiento con herramientas de evaluación a nivel de edificio.

Estos desarrollos pueden tratar de sustituir el 100 % de las instalaciones o no. Para el caso de elementos sustitutivos se debe avanzar en el desarrollo de modelos de funcionamiento para maximizar la eficiencia reduciendo los días de no confort. En caso de elementos complementarios avanzar en estudios de reducción de costes y compatibilidad de sistemas energéticos. Cabe aprovechar positivamente, por ejemplo, los aspectos relacionados con el rango de funcionamiento del PCM, haciendo que los sistemas de climatización del edificio operen únicamente fuera del rango de uso del PCM, de manera que no se utilicen fuentes de energía no renovables para activación del elemento con cambio de fase.

Optimización de soluciones: Avanzar en los estudios de uso combinado calefacción climatización. Fachadas captadoras y disipadoras de energía en

combinación con forjados como almacén térmico. Las fachadas con comportamiento diferenciado invierno-verano (dispositivos de control solar). Fachadas que dejen pasar calor en invierno opacas o protegidas de la insolación directa en verano (inclinación solar, vegetación caduca, etc.). Diseños adaptados a cada caso concreto y combinación de distintos tipos de PCMs a lo largo de las cámaras.

Investigación en soluciones particulares para problemas particulares. Soluciones concebidas para edificios nuevos y también para la rehabilitación de edificios existentes. Diseños optimizados.

La integración en productos industrializados generará soluciones innovadoras que deben ser evaluadas en cuanto su aptitud al uso. Para su aceptación será necesario que dispongan de documentos de idoneidad técnica a fin de demostrar a los técnicos prescriptores su validez y eficacia con garantía.

Diseños pensados para espacios o edificios de uso intermitente: habitaciones de hotel, edificios relacionados con el transporte (estaciones, aeropuertos). Diseños optimizados para edificios singulares: aeropuertos, grandes naves, talleres, edificios agrícolas, ganaderos, etc. Diseños en relación con sistemas energéticos. Eliminación de puntas de consumo: edificios de oficina. Uso combinado con otras tecnologías de enfriamiento y energías renovables, enfriamiento evaporativo, geotermia superficial.

Control y domótica para optimización y mejora de soluciones: Carga y descarga condicionada por condiciones climáticas y previsión meteorológica para procurar la máxima eficiencia. Mejorar las eficiencias con diseños de carga sin necesidad de ventilación forzada: más aperturas, aperturas móviles controladas, etc.

Aplicación de tecnología a casos reales: La mayor parte de las líneas propuestas anteriormente se refieren a lo que se suele llamar investigación precompetitiva, es decir aquella investigación cuyos resultados no son directamente comercializables y suponen un riesgo técnico elevado. Para que se produzca la utilización habitual de este tipo de materiales en construcción es necesario que existan experiencias reales exitosas. Por tanto se incluye en este punto, como no puede ser de otro modo, el desarrollo de sistemas completos industrializados, ejecución de edificios demostradores, prototipos, etc. Se puede avanzar en la estandarización y normalización.

Por último no se puede dejar de pensar en actividades relacionadas con la

transferencia del conocimiento y de transferencia en la innovación. La elaboración de herramientas de ayuda y la integración de modelos simplificados, como el propuesto, con herramientas de evaluación a nivel de edificio u otras herramientas de apoyo al proyecto son necesarias. Igualmente se necesita dar a conocer la tecnología y que esté disponible suficiente material de contenido técnico, consulta y apoyo. Es muy conveniente, como se ha dicho la elaboración de guías, ejemplos optimizados, fichas, etc. para distintos climas y tipos edificatorios.

Igualmente cabe pensar que en torno al almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase es posible, por su interés, la creación de empresas de base tecnológica o Spin-off, que saquen partido del conocimiento existente y ayuden a hacer las actividades de innovación señaladas de forma rentable.

Las líneas enunciadas se han centrado en el almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase en su relación con la eficiencia, no se puede dejar de mencionar otras investigaciones colaterales como puede ser en lo relacionado con el Análisis de Ciclo de Vida a nivel de edificio, de gran actualidad.

## 7.5. Conclusión final

En la actualidad existe un gran interés sobre la aplicación de los materiales de cambio de fase en los edificios lo que hace esperar un desarrollo tecnológico prometedor. España es fría y también es muy cálida, sin embargo el aire acondicionado no representa un consumo importante excepto en los edificios de uso terciario. Tradicionalmente en buena parte del territorio, en vivienda o no se instala refrigeración o ésta no se usa. Parece razonable que el comportamiento de los usuarios cambie con el aumento de nivel de vida. Como en el caso de la calefacción en invierno, el nivel de bienestar térmico en verano estará ligado a los recursos disponibles de los usuarios, máxime ante la escalada de los precios de la energía.

Si se pretende aumentar el nivel de bienestar y simultáneamente reducir la huella de carbono solo queda el camino de la eficiencia y las energías renovables. El almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase participa de ambas. Además los diseños que aprovechan el potencial renovable son muy aceptados por la sociedad cuya conciencia colectiva apuesta por la sostenibilidad.

Como toda tecnología basada en energía renovable, no será capaz de cubrir el 100 % de la demanda o del tiempo. Si los periodos de falta de confort son asumibles, la percepción global de bienestar puede ser lo suficientemente alta como para que el usuario pueda elegir esta tecnología en exclusiva, sin sistemas complementarios.

Por otra parte todos los edificios no son de uso vivienda, ni siquiera residenciales. El almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase presenta muchas posibilidades para limitar la demanda de energía lo que en algunos casos es imposible de lograrse mediante técnicas convencionales.

Se ha analizado la integración en distintos elementos constructivos no encontrando obstáculos o dificultades técnicas que impidan la integración. La instalación de soluciones con PCM, cara en sí, puede ser competitiva sobre todo cuando lleve aparejada la eliminación o sustitución de equipos por otros de menor potencia.

Las condiciones operacionales son trascendentes para un correcto funcionamiento del sistema. La carga y la descarga se deben producir en horarios previamente establecidos conforme a una estrategia de reducción del consumo, estando además sujetas a condiciones adicionales de temperatura y previsión meteorológica; lo cual es actualmente posible. Siempre se puede optimizar el funcionamiento para mejorar el rendimiento del sistema.

La utilización combinada del almacenamiento estructural de energía con PCM y los sistemas energéticos del edificio, puede contribuir al ahorro manteniendo el nivel de bienestar térmico en términos de coste eficacia, y de forma aún más sostenible, si se hace uso de energía renovable.

Como conclusiones concretas derivadas de lo desarrollado en la tesis cabe añadir los siguientes puntos:

- El diseño de las soluciones debe ser acorde con los objetivos que se persigan en cuanto a la cuantía y duración de las descargas, siendo las cargas función del potencial disponible.
- La solución idónea pasa por analizar la necesidad de respuesta de los elementos que contengan el PCM y su ubicación en relación con fuentes y sumideros de energía. El edificio muestra muchas posibilidades

para albergar el PCM tanto en la envolvente como en las particiones interiores.

- El almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase permite neutralizar parte de la demanda energética y mejorar el consumo. Para la mejora de la demanda se debe concebir el sistema como parte del edificio debiendo ser su funcionamiento lo más pasivo posible, evitando así el gasto energético asociado. Como elemento de mejora del consumo permite la optimización de las instalaciones al reducir el pico de la demanda.
- Se ha comprobado el comportamiento fiable de los modelos simplificados. Estos modelos deben ser calibrados para verificar su validez. El uso de modelos simplificados proporciona una agilidad suficiente para evaluar distintos diseños equivalentes y seleccionar el más adecuado en función del uso y el potencial climático.
- Las variables fundamentales (cantidad de PCM, superficie de exposición, coeficientes de transferencia y velocidad del aire) determinan, junto con la composición del elemento constructivo que conforma la cámara, el comportamiento del sistema. Se puede lograr una eficiencia alta tanto con elementos ligeros como pesados. La influencia de la cantidad de material cambio de fase es preponderante frente a la masa térmica de los elementos constructivos. Aún así no se puede despreciar el efecto de la inercia térmica de los elementos confinadores. Las fachadas pesadas al exterior sin aislamiento presentan un número mayor de periodos de sobrecalentamiento.
- El efecto de estabilización térmica proporcionado por la cámara tiene influencia tanto en condiciones de verano como de invierno. La influencia de la estabilización debida a la cámara es menor que la derivada de la ventilación pero nada despreciable. El efecto de la cámara supone aproximadamente un 20 % del correspondiente a la ventilación. En caso de edificios fuertemente aislados el efecto de la cámara es insignificante, y por ello la eficiencia global disminuye.
- El valor de la eficiencia de la fachada es muy sensible a las condiciones operacionales, es decir el control horario más las condiciones impuestas de temperatura.
- El potencial mayor en la carga generalmente se obtiene en el periodo comprendido entre las 23 horas y las 9 horas del día siguiente. La simulación demuestra que en muchos días no será necesario usar este

periodo completo. En los días en los que la carga se prolongue más allá del punto de mínima temperatura nocturna se puede seguir cargando ya que la menor temperatura de los primeros elementos que contienen el PCM contribuirá a seguir enfriando los siguientes.

- En general, la necesidad de descarga en los climas analizados se produce entre las 12 y las 19 horas. La duración de la descarga requerida hará necesario proteger en menor o mayor medida los elementos que contienen el PCM.
- Se ha demostrado el interés y oportunidad en los modelos simplificados del uso de parámetros adimensionales tales como los definidos para los intercambiadores regenerativos  $\Lambda$  y  $\Pi$ . Estos parámetros facilitan el análisis de resultados proporcionando gran estabilidad a los mismos al condensar en un único valor las variables fundamentales que influyen en el comportamiento para cada solución.
- El estudio de los sistemas de almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase como intercambiadores regenerativos es interesante de cara a la elaboración de métodos simplificados tipo 2. Los modelos permiten realizar estimaciones rápidas que demuestran su validez como herramientas de prediseño en condiciones ideales. El intercambiador será estático (carga y descarga separadas) y generalmente no tiene por qué ser simétrico y balanceado. Las condiciones de carga y descarga pueden ser diferentes y además existirán siempre pérdidas.
- Las eficiencias obtenidas de los casos estudiados se pueden considerar muy altas así como la energía en refrigeración que los distintos sistemas proporcionan. La obtención de valores cercanos a 10 supone un punto de partida muy interesante de cara al diseño optimizado de nuevas soluciones.
- El precio del material de cambio de fase es fundamental para la viabilidad económica de estos sistemas. Como orden de magnitud se ha visto que en el caso de fachada es necesario reducir el umbral de los 3 €/kg.

Por todo lo antedicho se puede afirmar que queda demostrada la hipótesis de que el ahorro energético en edificios mediante el almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase es a todas luces viable.

El desarrollo de la tecnología asociada al almacenamiento estructural con materiales de cambio de fase es incipiente. La utilización de PCMs como elementos de ahorro energético permite un juego muy amplio de posibilidades



---

en cuanto a la integración todavía no exploradas. En cualquier caso queda mucho por investigar, afortunadamente.



# Apéndice A

## Resultados de las simulaciones

### A.1. Cálculo de indicadores

En este apartado se recogen los resultados de los casos analizados en el apartado 5.3.2.3, página 168.

Los casos analizados son el resultado de variar los siguientes parámetros para el sistema de fachada seleccionada:

Localidades:

Cuenca, Madrid, Lleida, Granada, Cáceres y Sevilla.

Cantidad de PCM en  $kg/m^2$ :

0  $kg/m^2$ , 20  $kg/m^2$ , 40  $kg/m^2$ , 60  $kg/m^2$ , 80  $kg/m^2$  y 100  $kg/m^2$ .

Espesor del elemento exterior masivo:

0,00 m, 0,05 m, 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m y 0,25 m.

Espesor del elemento interior masivos:

0,05 m, 0,10 m, 0,15 m, 0,20 m, 0,25 m y 0,30 m.

Espesor del aislamiento del elemento exterior seleccionado:

0,02 m, 0,04 m, 0,06 m, 0,08 m, 0,10 m y 0,12 m.

El aislamiento se dispone al interior de la cámara.

Espesor del aislamiento del muro interior:

0,02 m, 0,04 m, 0,06 m, 0,08 m, 0,10 m y 0,12 m.

El aislamiento se dispone al interior de la cámara, es decir aislamiento

por el exterior del muro.

Velocidades de funcionamiento del sistema:

1,0 m/s, 1,5 m/s, 2,0 m/s, 2,5 m/s, 3,0 m/s, 3,5 m/s, 4,0 m/s, 4,5 m/s y 5,0 m/s.

Las figuras corresponden con los siguientes indicadores:

- Energía de Carga.  $E_{Carga}$ : Figura A.1
- Energía de Descarga.  $E_{Descarga}$ : Figura A.2
- Factor de utilización.  $f_U$ : Figura A.3
- Factor de equilibrio.  $f_E$ : Figura A.4
- Factor de carga real.  $f_{Cr}$ : Figura A.5
- Factor de carga de diseño.  $f_{Cd}$ : Figura A.6
- Factor de instalación.  $f_I$ : Figura A.7
- Factor de diseño.  $f_D$ : Figura A.8
- Factor de ventilación.  $f_V$ : Figura A.9
- Factor del efecto cámara.  $f_C$ : Figura A.10
- Eficiencia Global de la fachada.  $\varepsilon_{GF}$ : Figura A.11
- Fachada como intercambiador regenerativo.  $\eta$ : Figura A.12

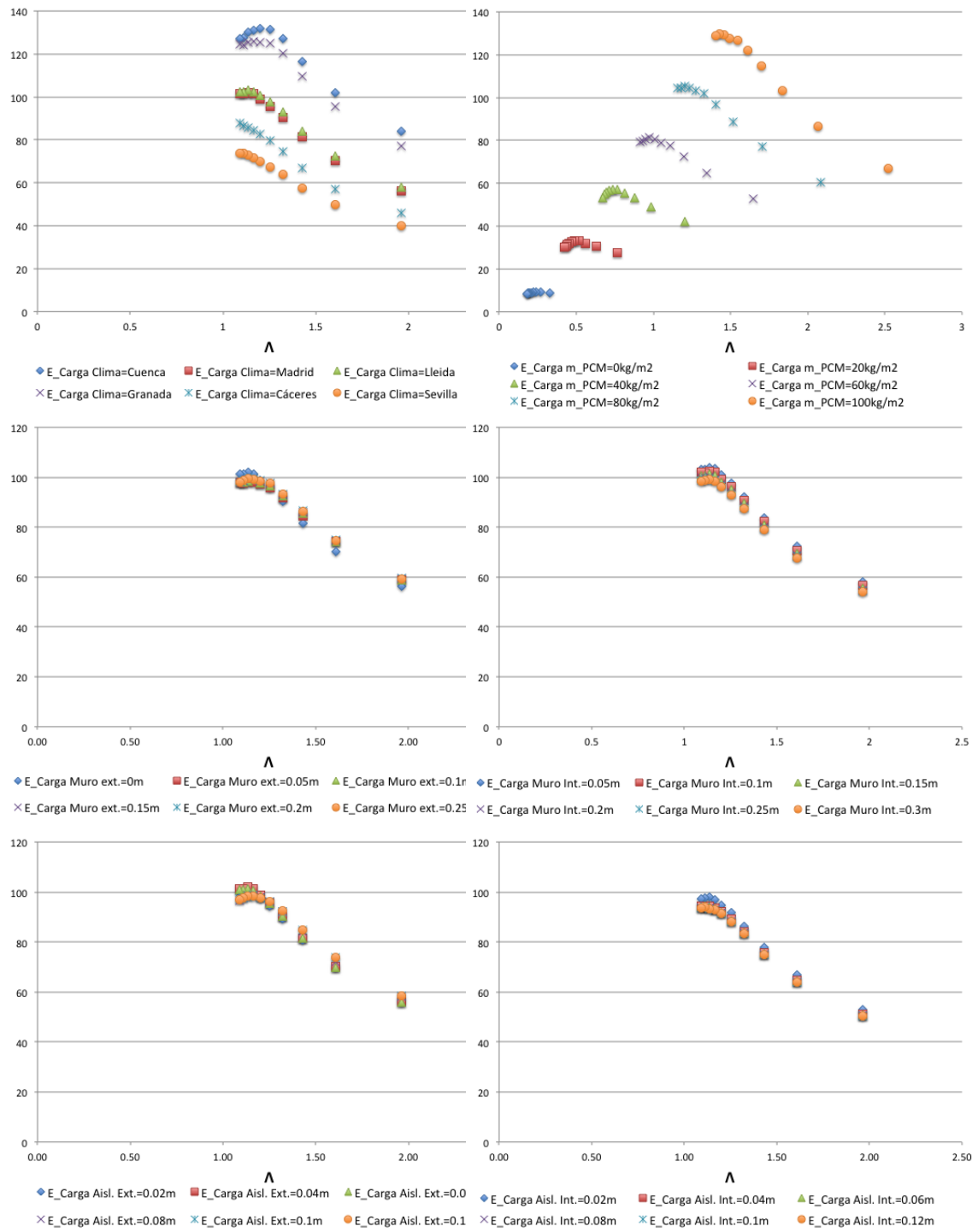


Figura A.1: Resultados del cálculo de indicadores. Energía de Carga

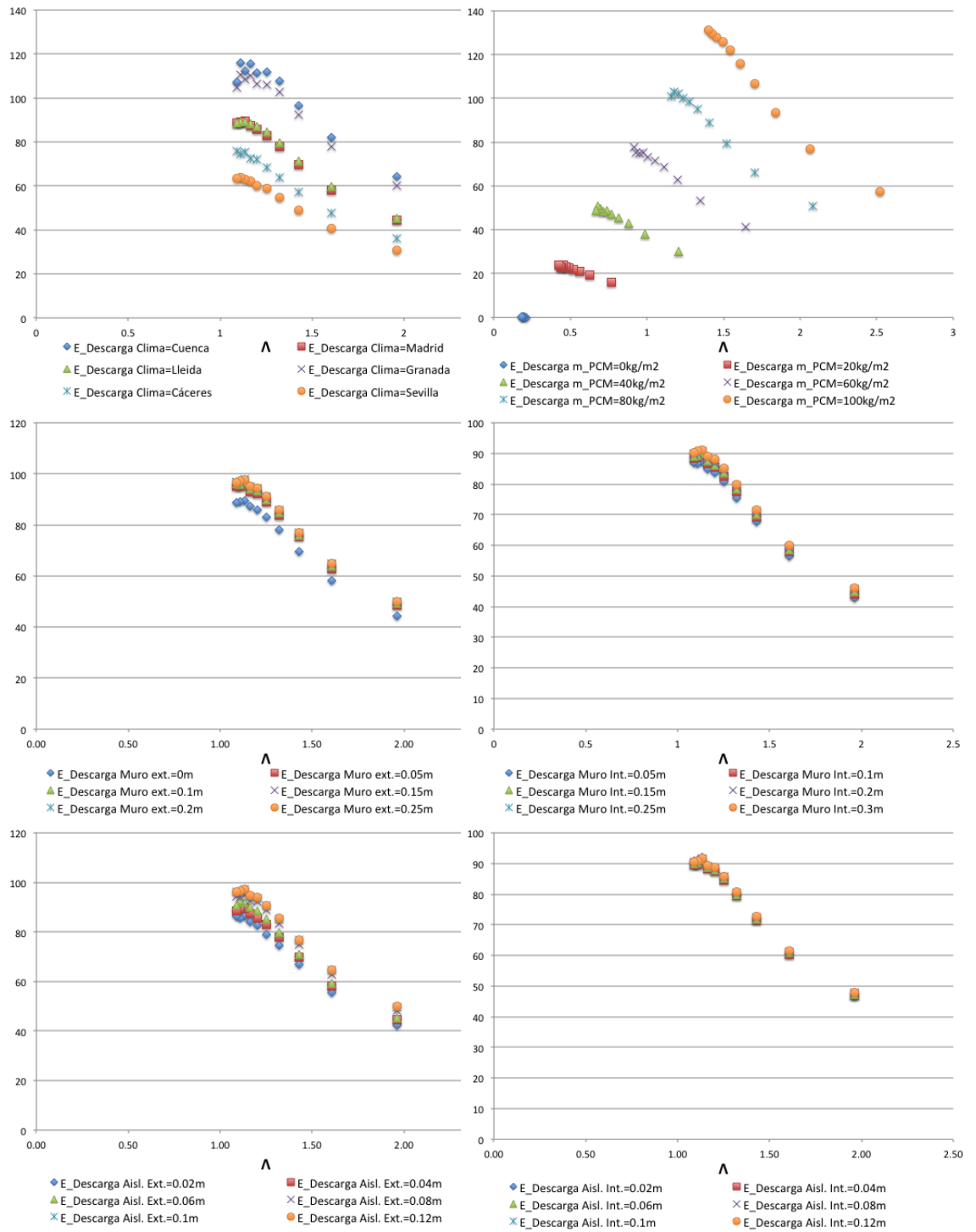


Figura A.2: Resultados del cálculo de indicadores. Energía de Descarga

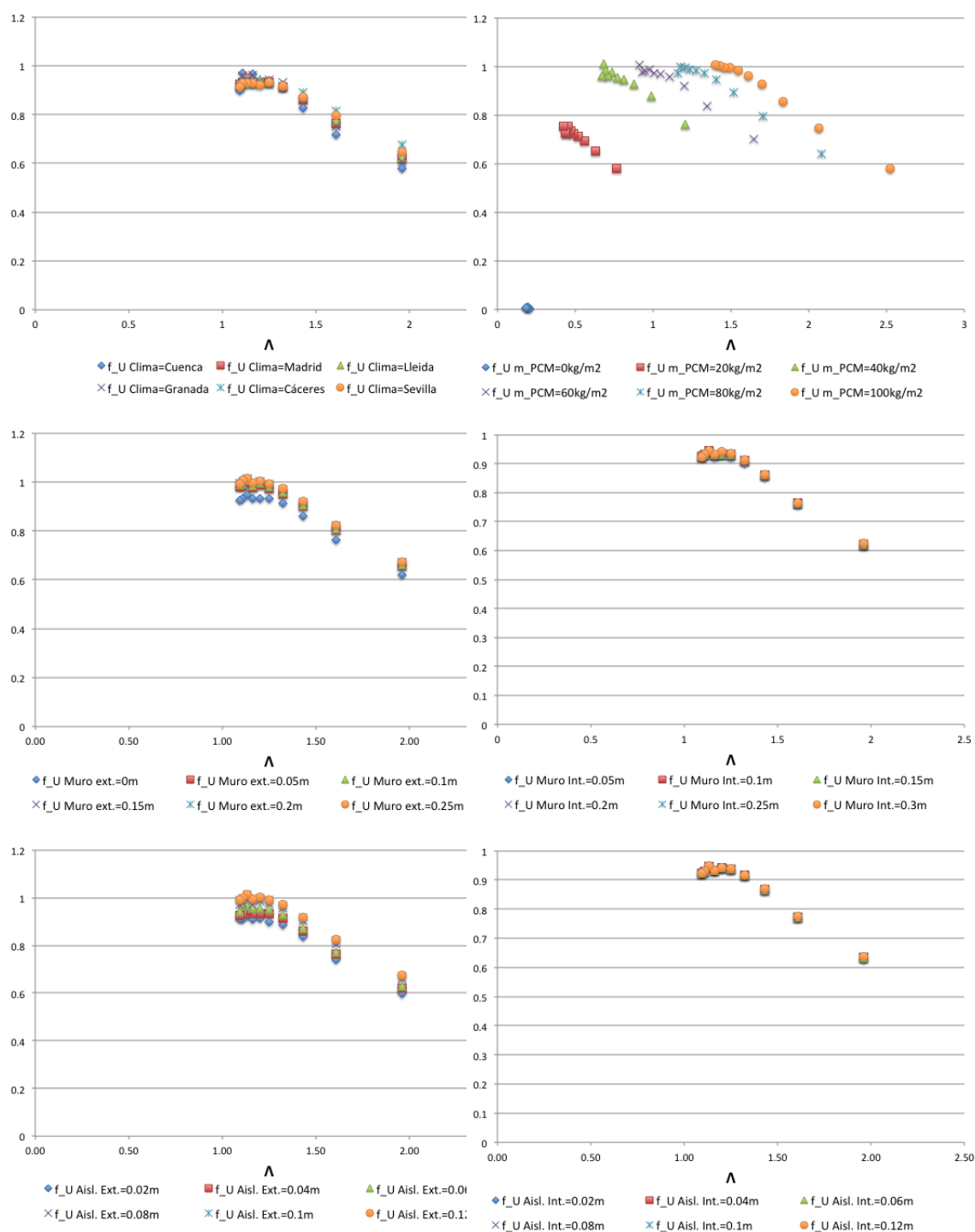


Figura A.3: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Utilización

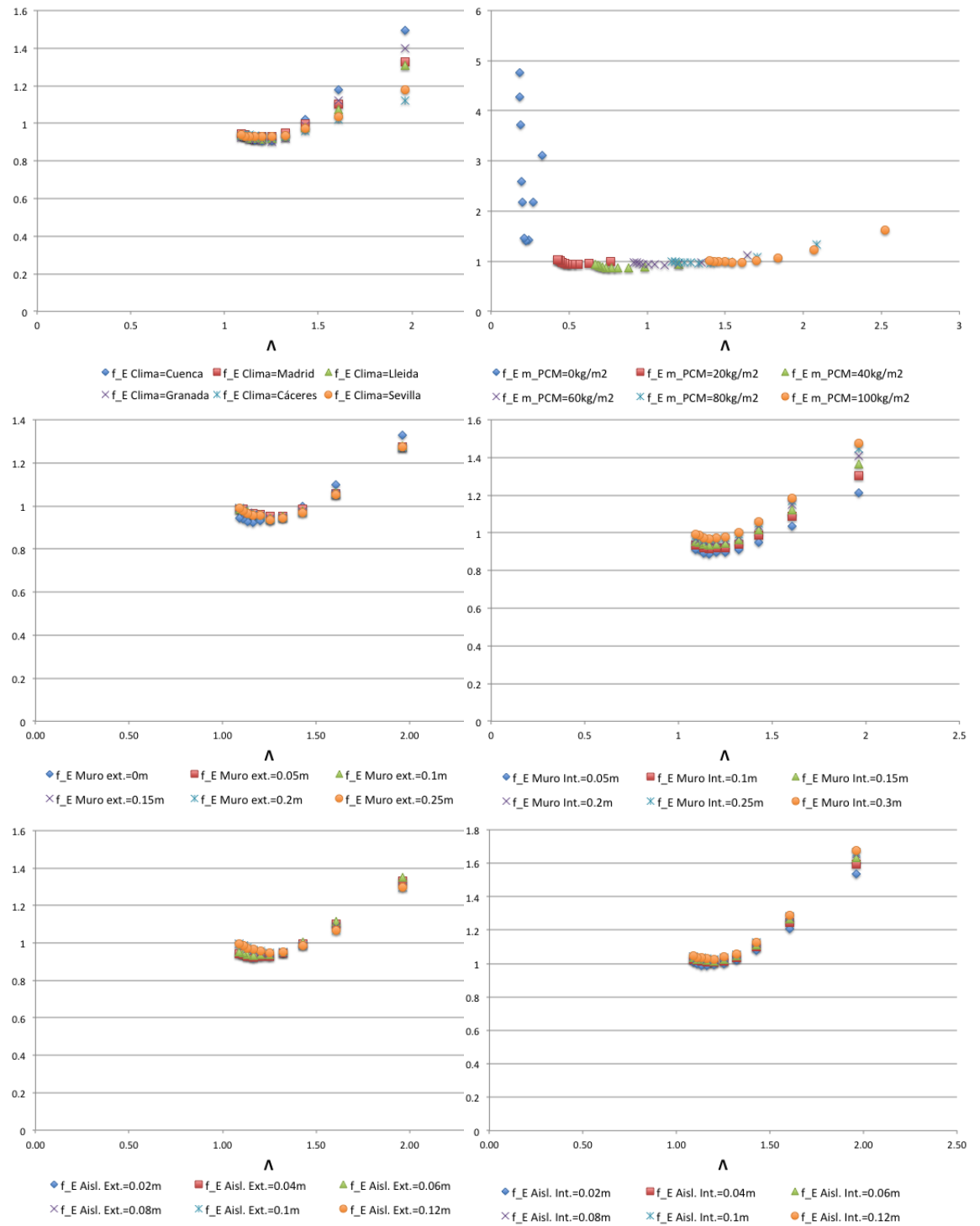


Figura A.4: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Equilibrio



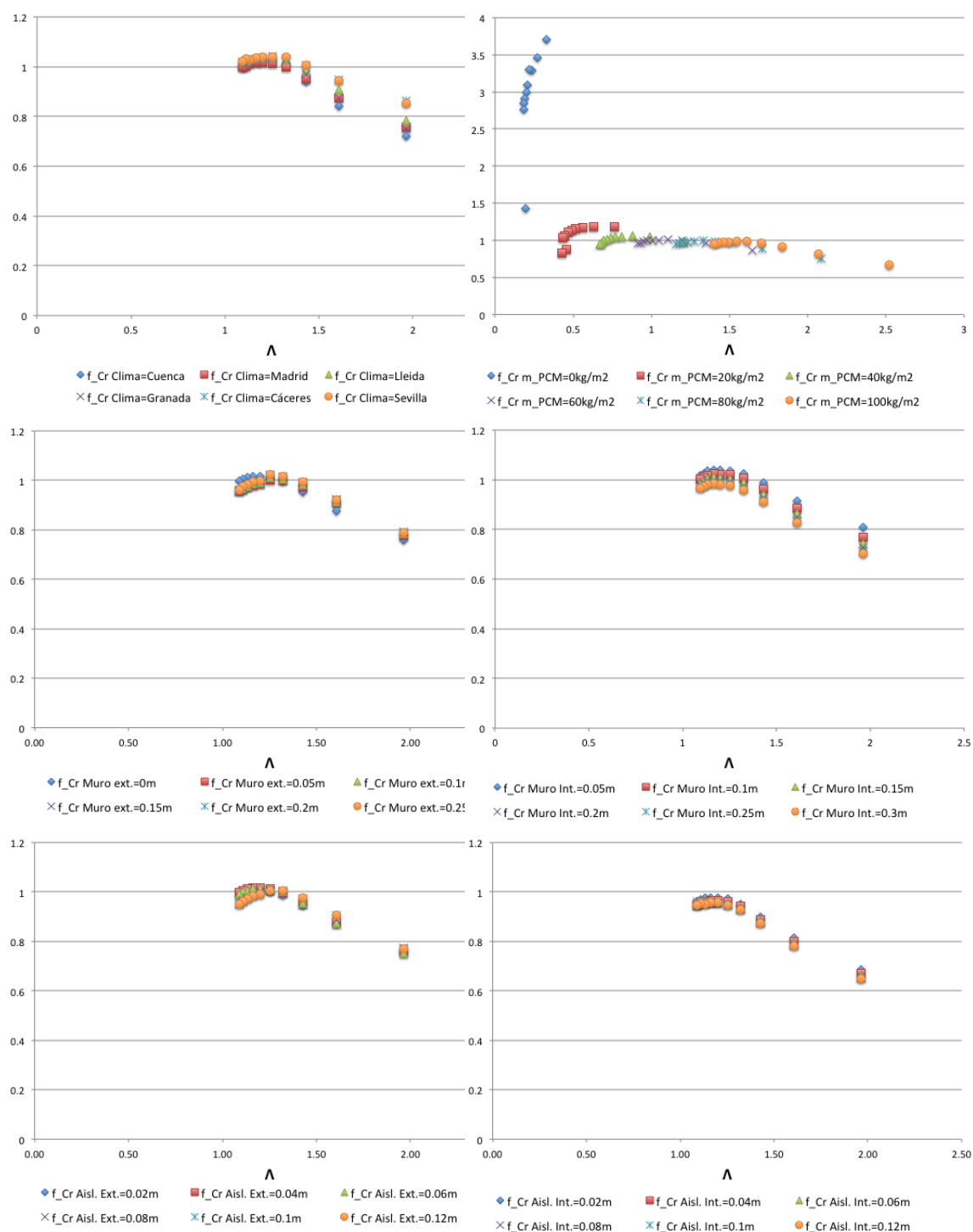


Figura A.5: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Carga Real

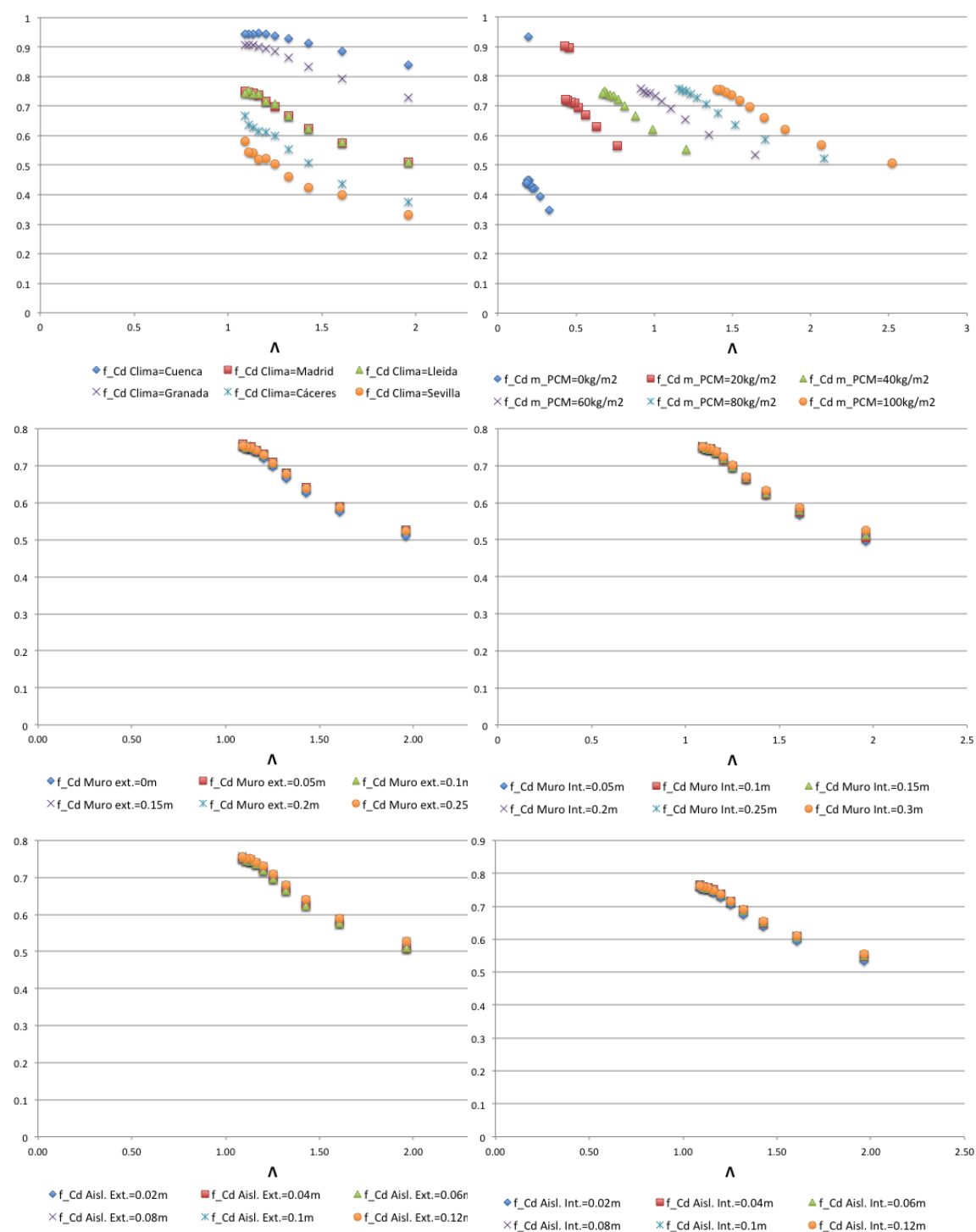


Figura A.6: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Carga de Diseño

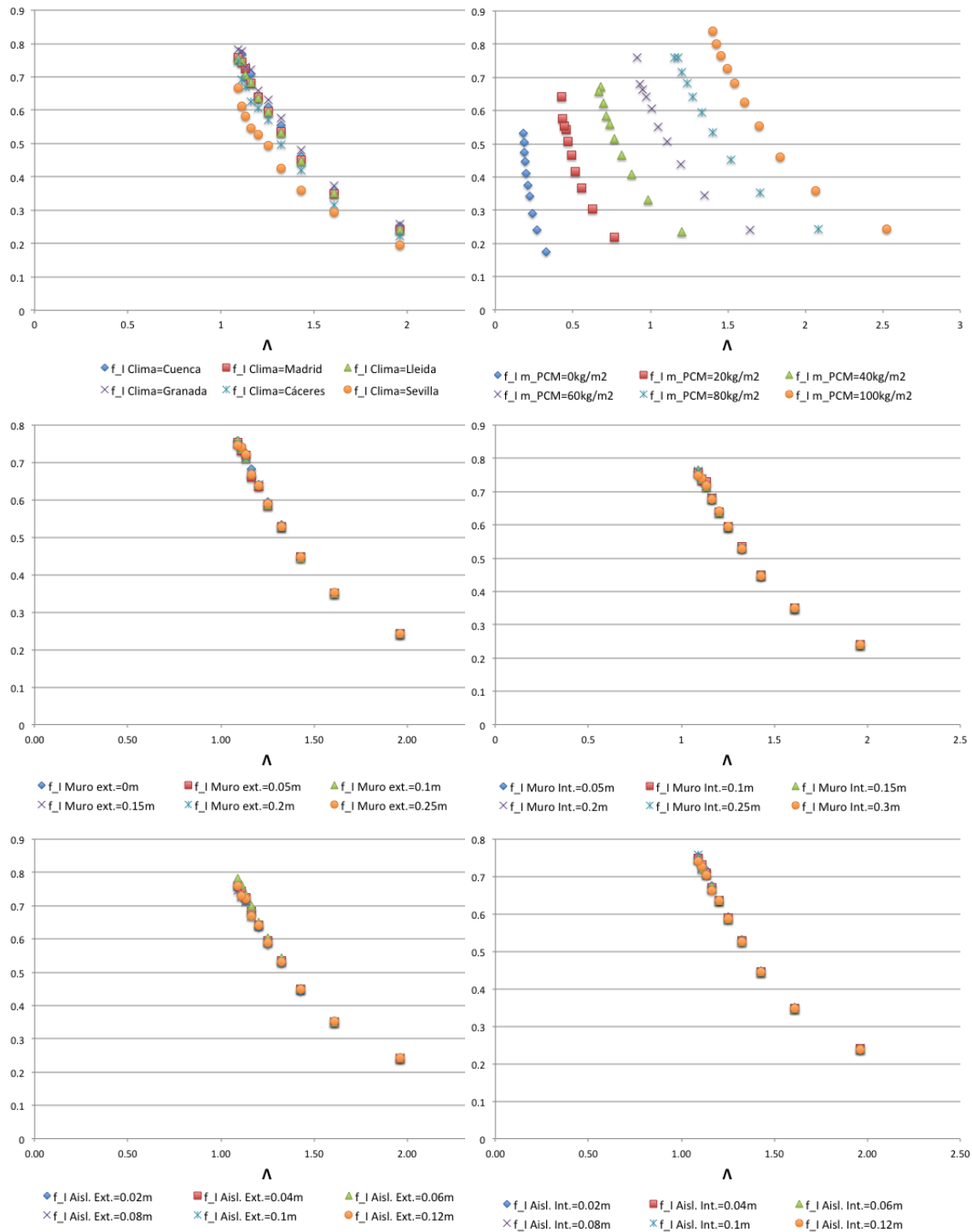


Figura A.7: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Instalación

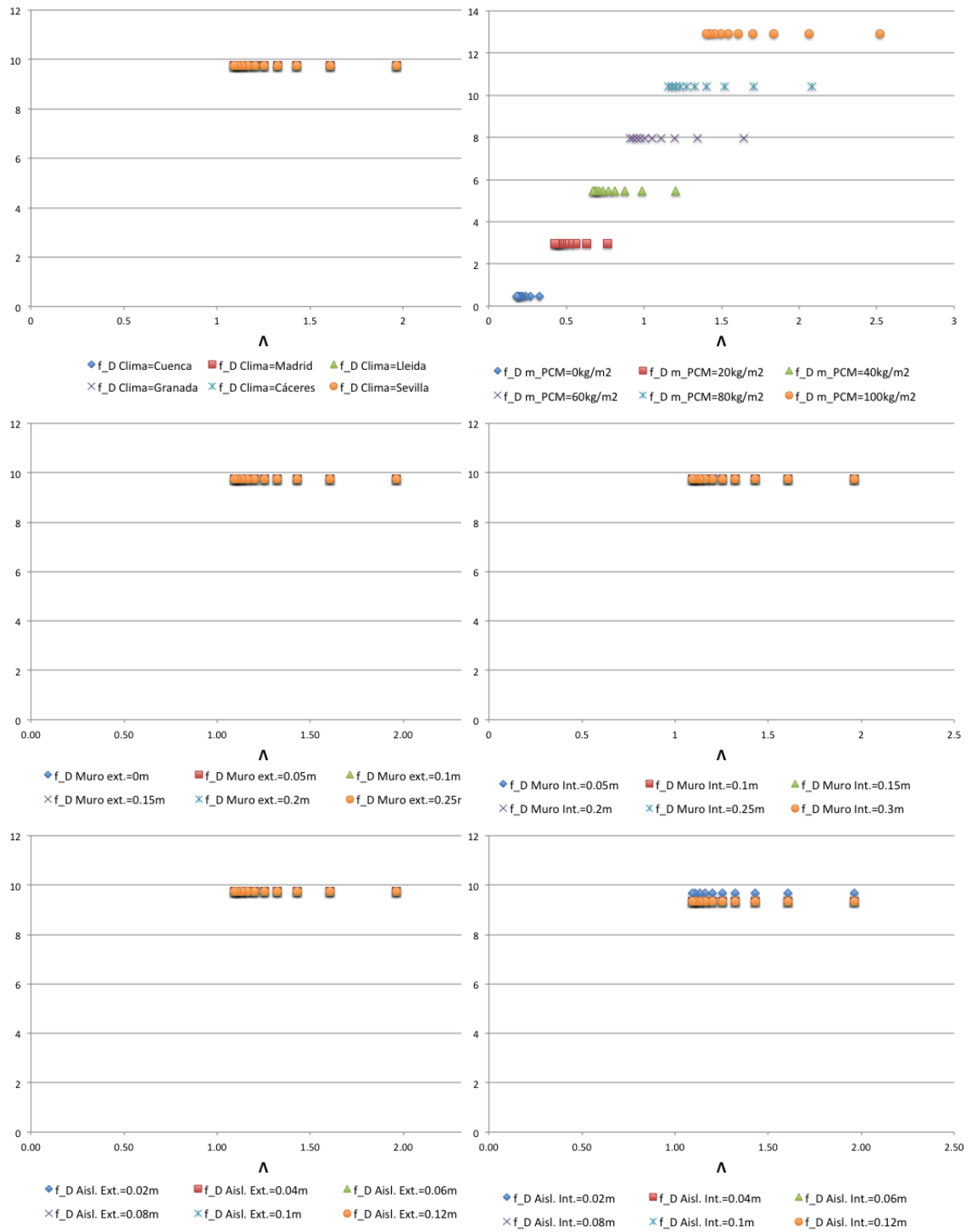


Figura A.8: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Diseño

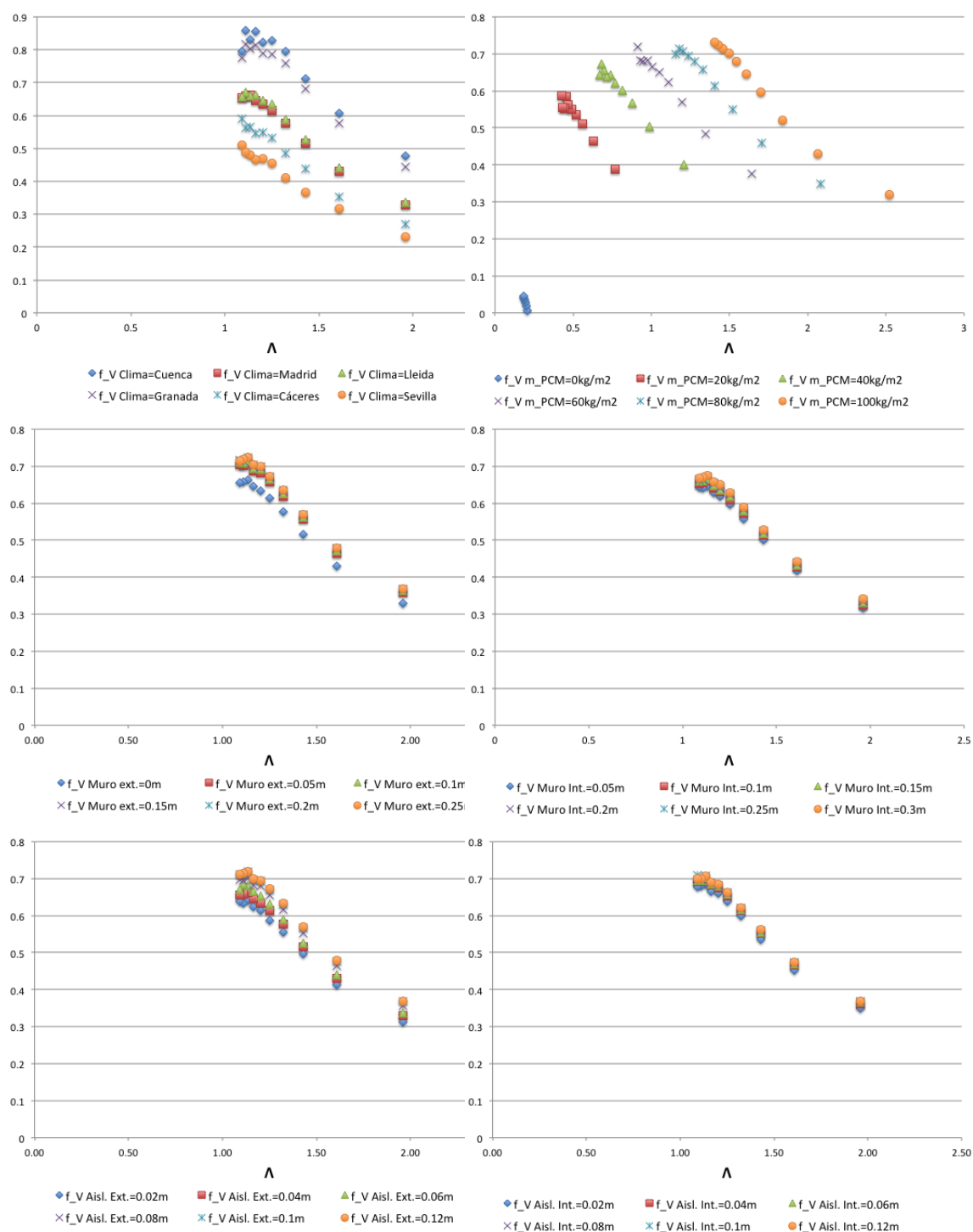


Figura A.9: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de Ventilación

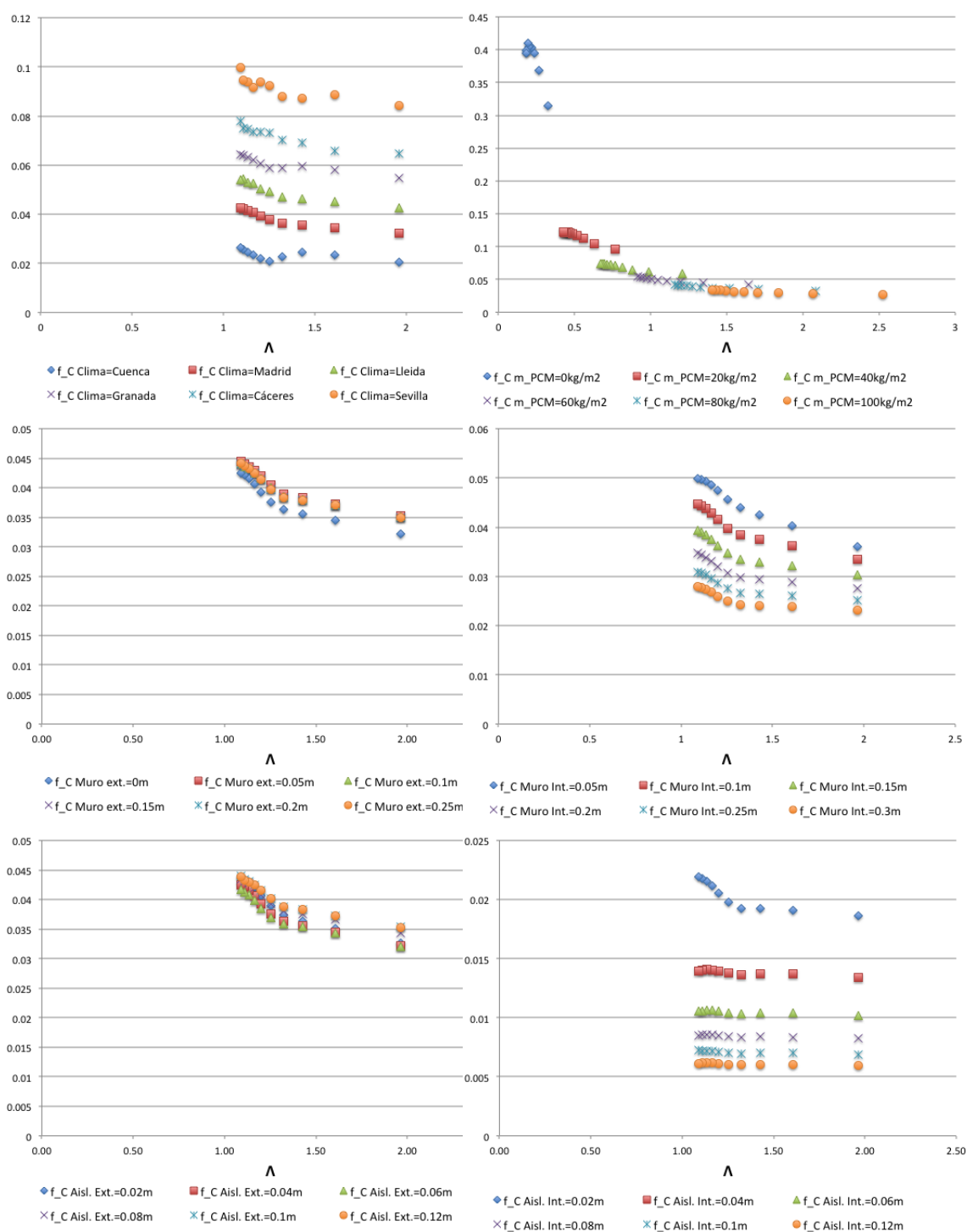


Figura A.10: Resultados del cálculo de indicadores. Factor de efecto Cámara

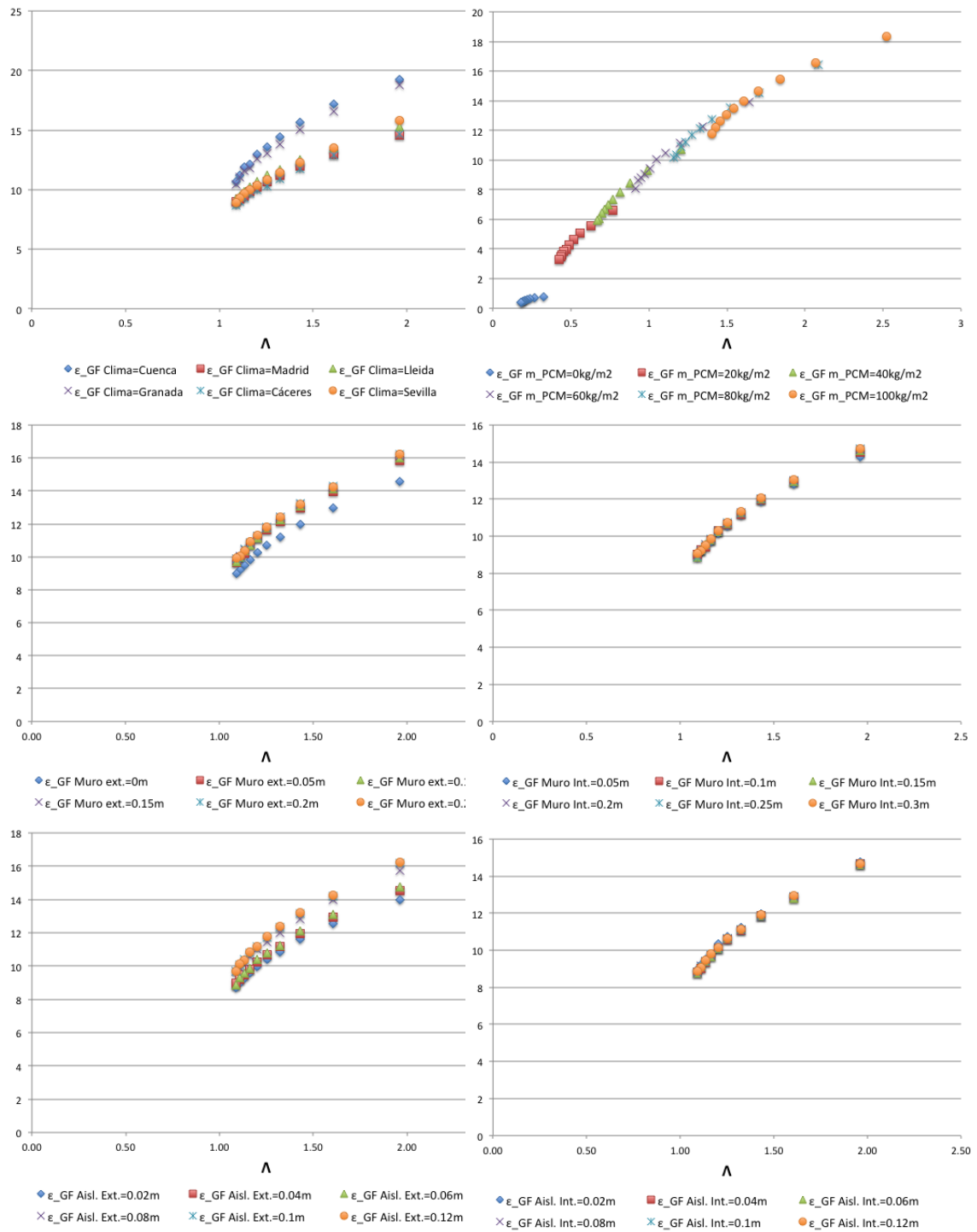


Figura A.11: Resultados del cálculo de indicadores. Eficiencia Global de Fachada

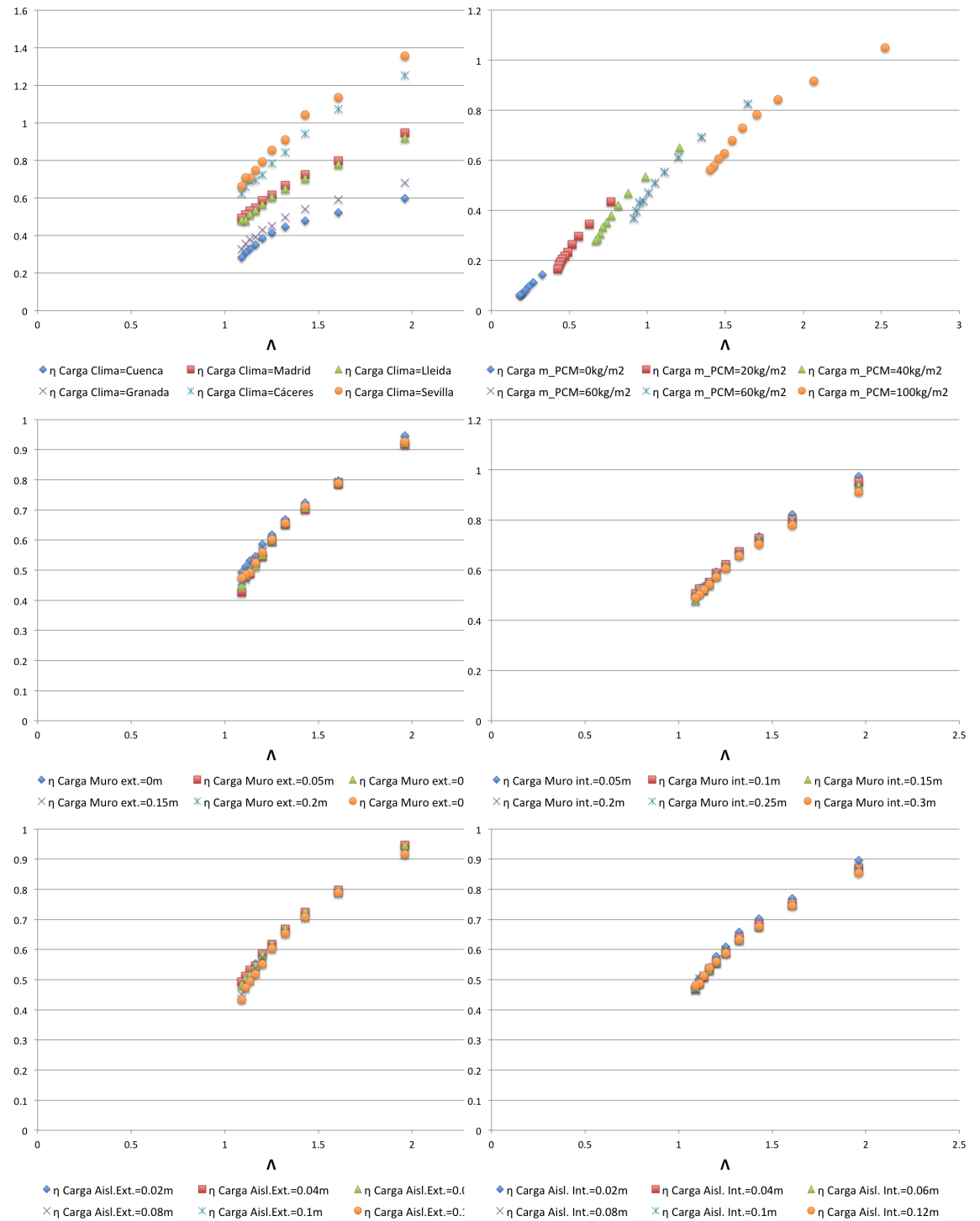


Figura A.12: Resultados del cálculo de indicadores. Rendimiento como intercambiador regenerativo. Carga.



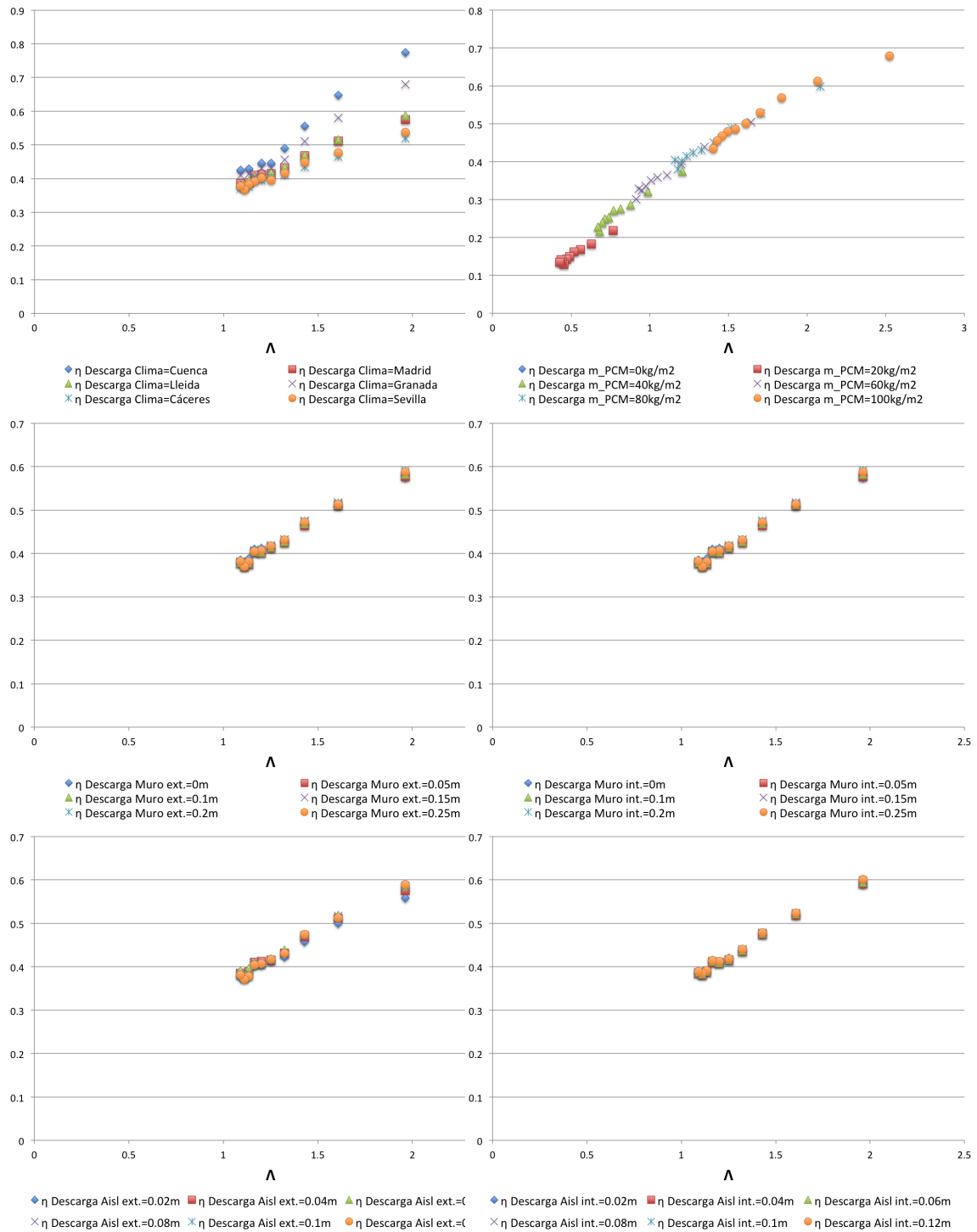


Figura A.13: Resultados del cálculo de indicadores. Rendimiento como intercambiador regenerativo. Descarga.

## A.2. Estudio de casos

En este apartado se recogen los resultados de los casos analizados en el apartado 6.4.2, página 209. Los casos son los siguientes:

1. Elemento exterior ligero, elemento interior ligero
2. Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara
3. Elemento exterior ligero, muro interior masivo
4. Elemento exterior masivo, elemento interior ligero
5. Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara
6. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara
7. Elemento exterior masivo, muro interior masivo
8. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo

### A.2.1. Caso 1. Elemento exterior ligero, elemento interior ligero

La fachada ligera de doble hoja resulta muy sencilla de industrializar y al ser poco masiva presenta una inercia térmica reducida. En la tabla A.1 se recoge la composición completa de la fachada simulada. La figura A.14 muestra un esquema de la fachada.

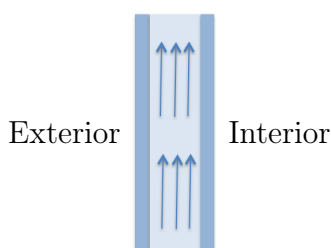


Figura A.14: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior ligero.

Los resultados del caso se muestran en las figuras A.15 y A.16 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.17 y A.18 para distintos climas.

Tabla A.1: Fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior ligero.

Elemento exterior: Hoja aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Hoja aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04



Figura A.15: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A1. PCM variable

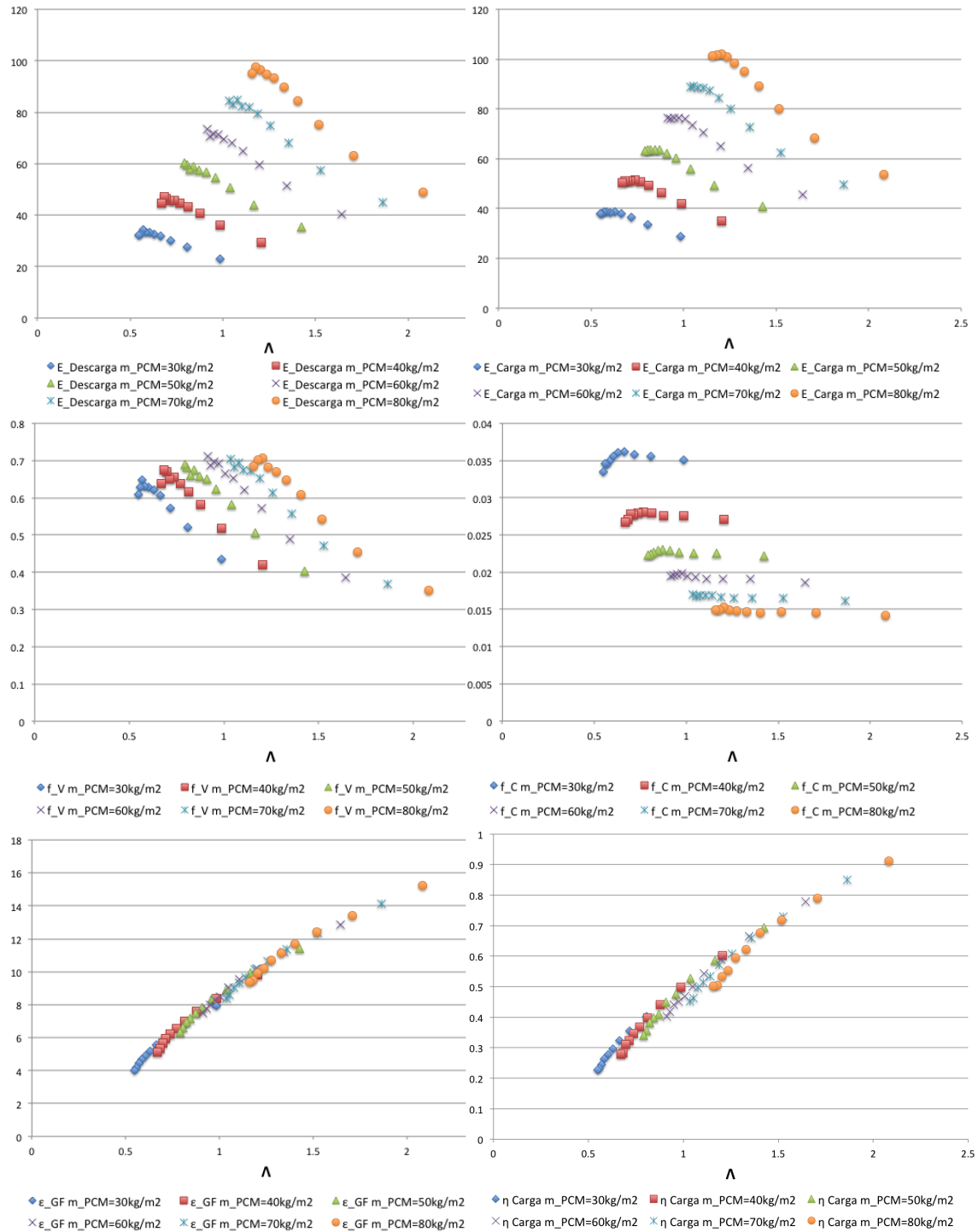


Figura A.16: Indicadores globales. Caso:A1. PCM variable

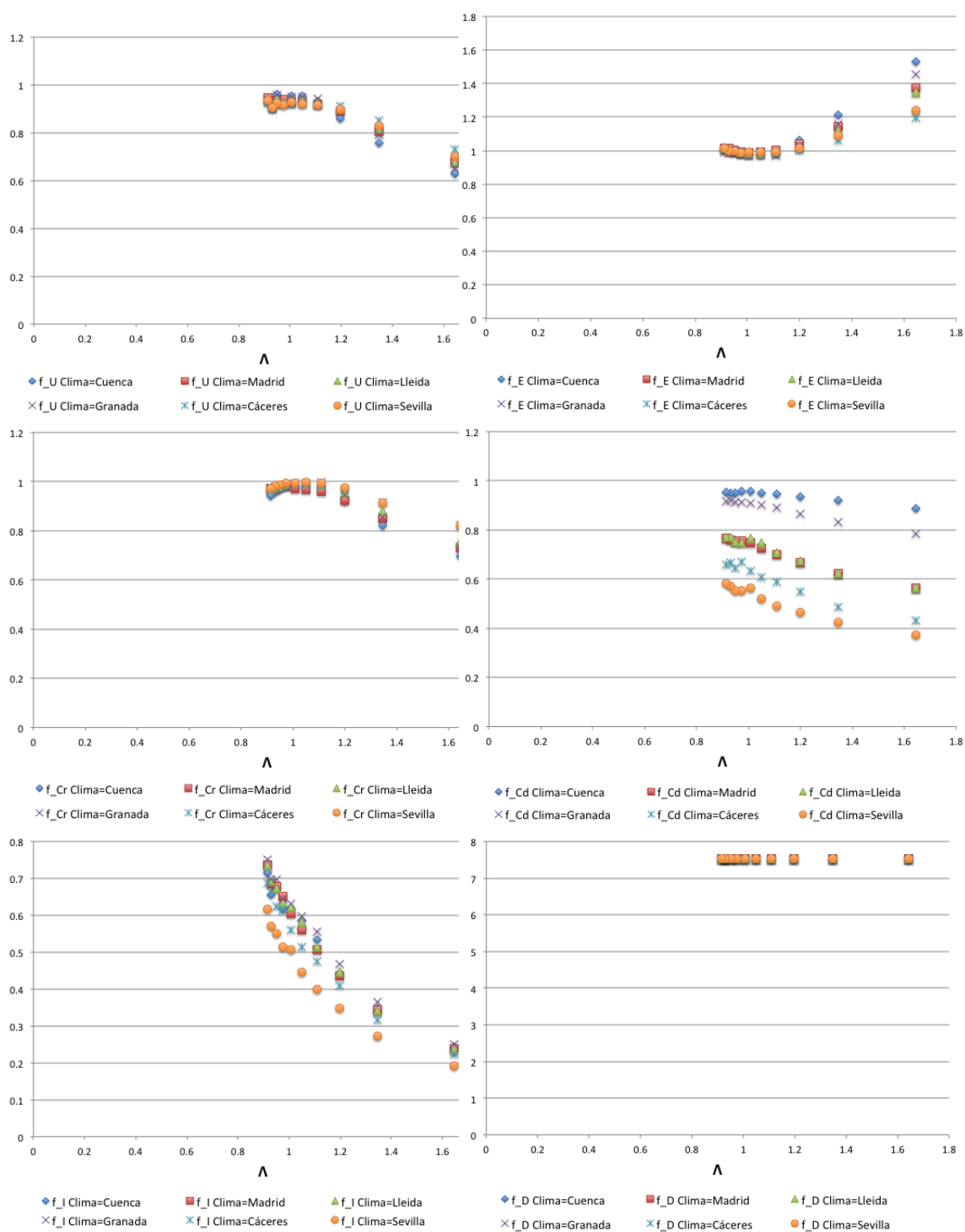


Figura A.17: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A1. clima variable

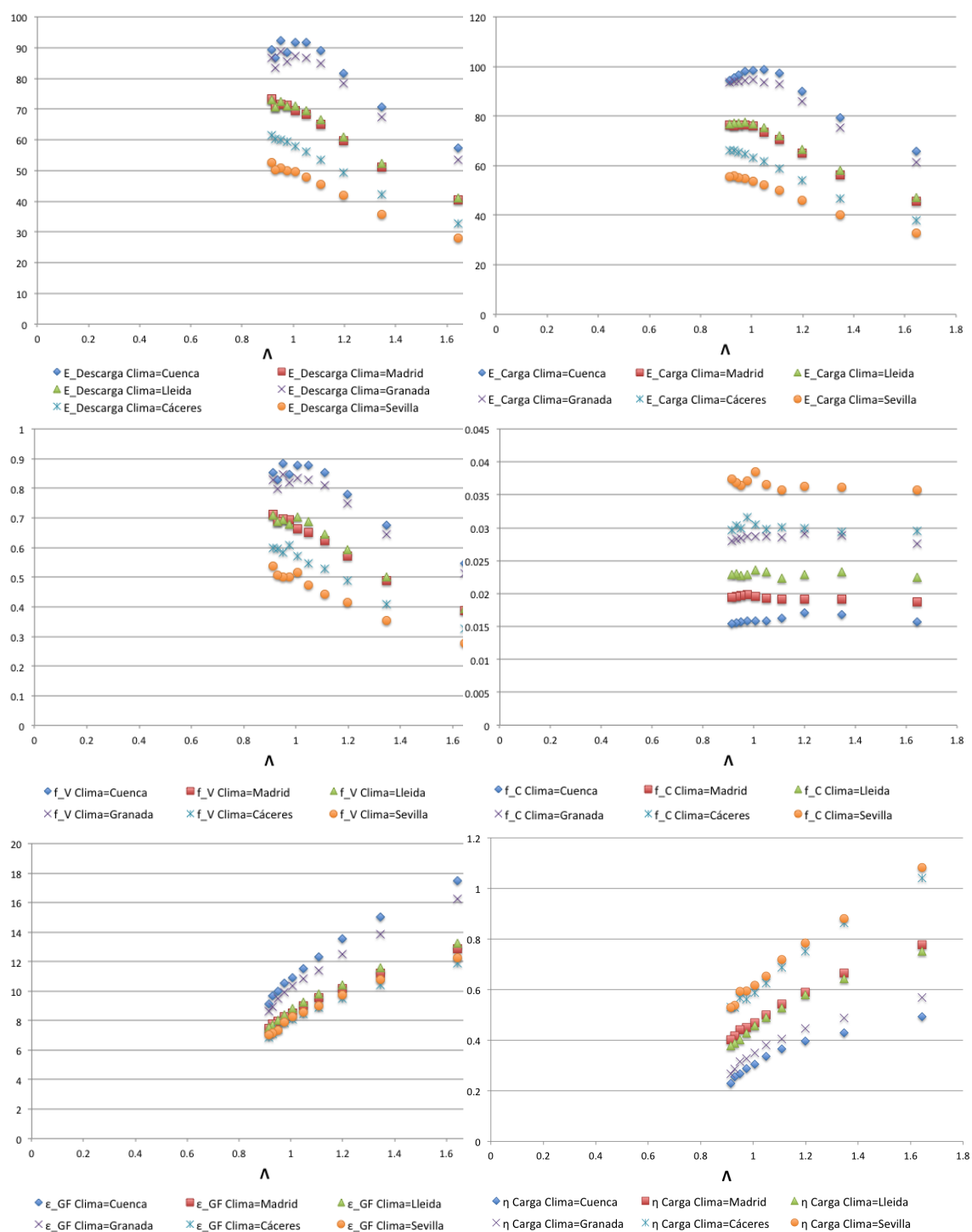


Figura A.18: Indicadores globales. Caso:A1. clima variable

### A.2.2. Caso 2. Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara

Esta tipología sería una variante de las fachadas ventiladas tradicionales y sería válida en la rehabilitación de edificios existentes. En la tabla A.2 se recoge la composición completa de la fachada simulada.

La figura A.19 muestra un esquema de la fachada.

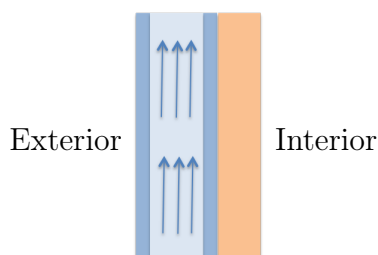


Figura A.19: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara.

Los resultados del caso se muestran gráficamente en las figuras A.20 y A.21 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.22 y A.23 para distintos climas.



Tabla A.2: Fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara.

Elemento exterior: Hoja aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Aislante exterior, hoja interior de fábrica	
Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Hoja interior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60



Figura A.20: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A2. PCM variable

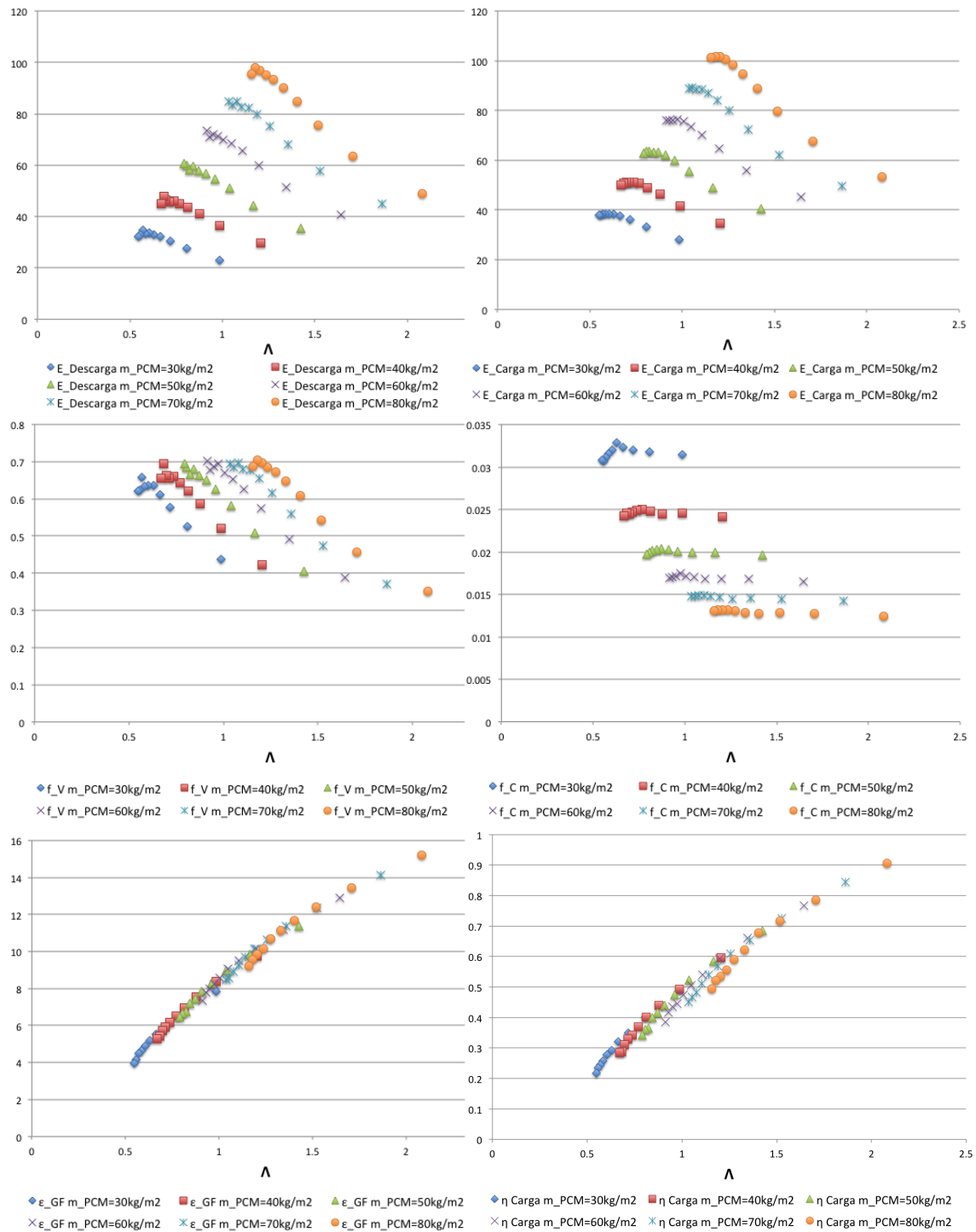


Figura A.21: Indicadores globales. Caso:A2. PCM variable

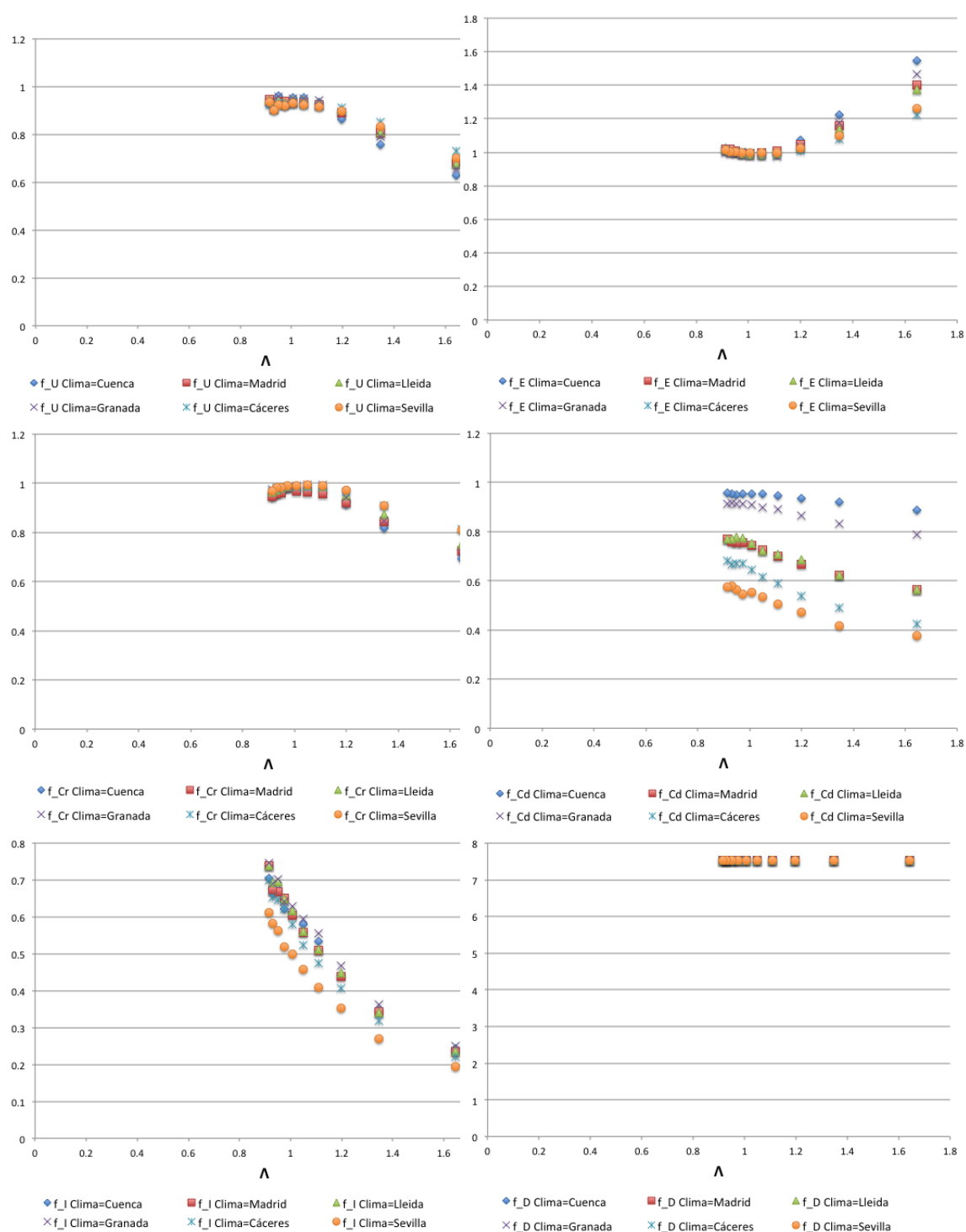


Figura A.22: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A2. clima variable

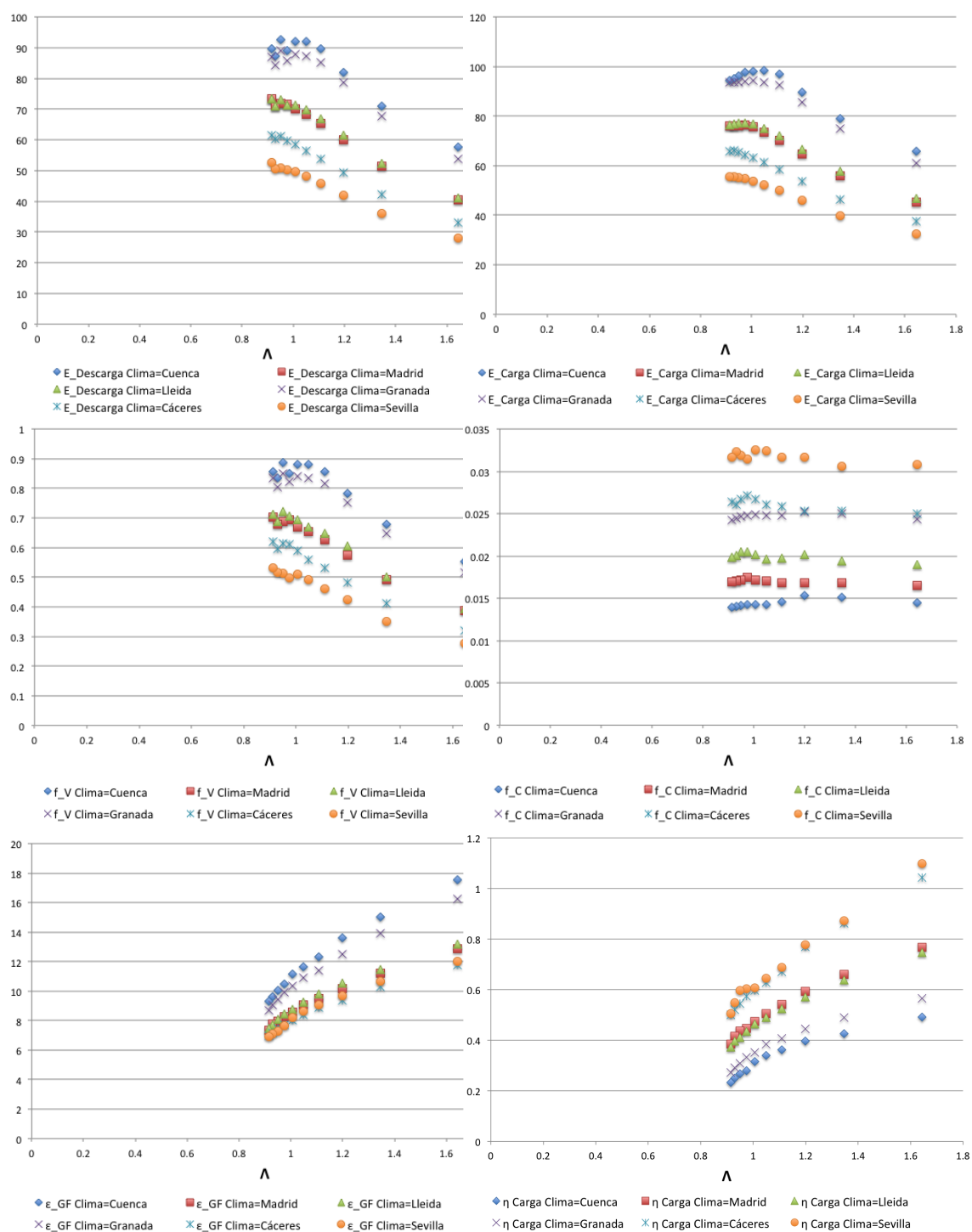


Figura A.23: Indicadores globales. Caso:A2. clima variable

### A.2.3. Caso 3. Elemento exterior ligero, muro interior masivo

La fachada agrupa varios subtipos. El muro interior podría ser de una única hoja (bloque cerámico aligerado) o varias, medio pié de ladrillo, aislamiento y trasdosado. Sería una variante del anterior sin aislamiento o con el propio de una solución de fachada existente (rehabilitación). En la tabla A.3 se recoge la composición completa de la fachada simulada.

La figura A.24 muestra un esquema de la fachada.

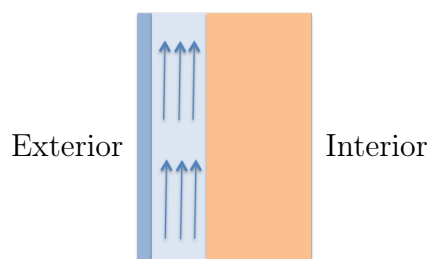


Figura A.24: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, muro interior masivo.

Los resultados del caso se muestran gráficamente en las figuras A.25 y A.26 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.27 y A.28 para distintos climas.

Tabla A.3: Fachada compuesta por: Elemento exterior ligero, muro interior masivo.

Elemento exterior: Hoja aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Hoja interior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,29
Densidad ( $kg/m^3$ )	1000
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,40

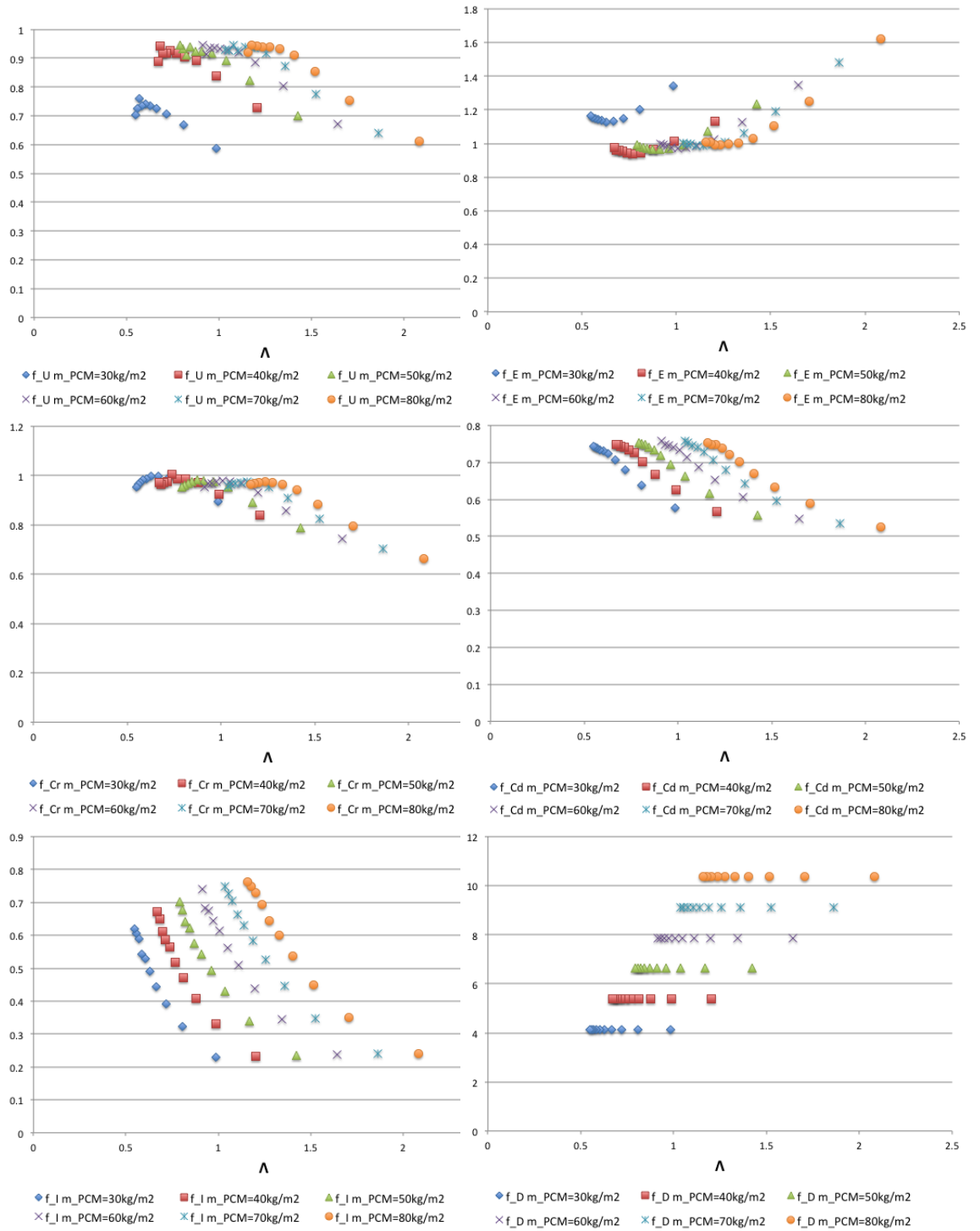


Figura A.25: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A3. PCM variable



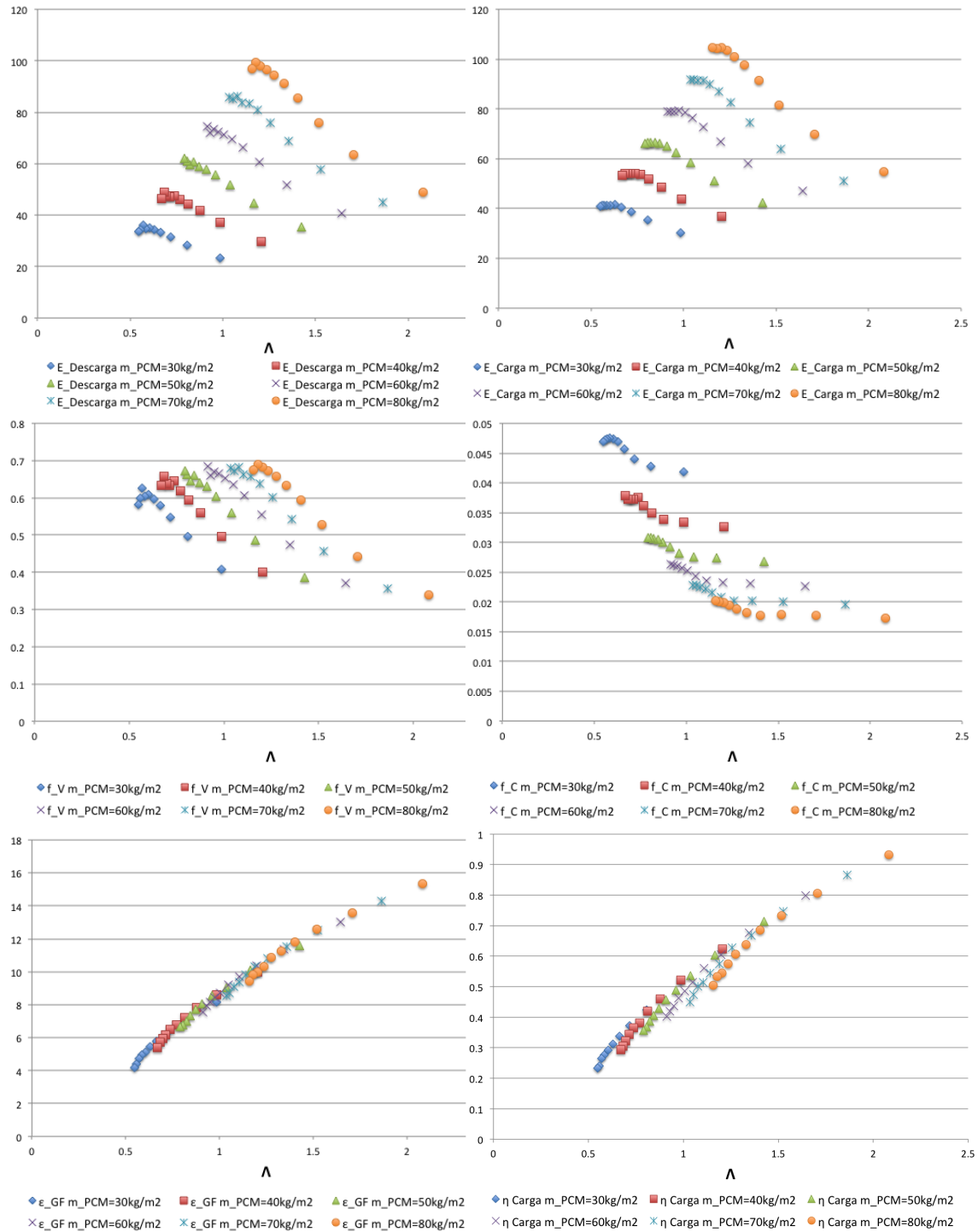


Figura A.26: Indicadores globales. Caso:A3. PCM variable

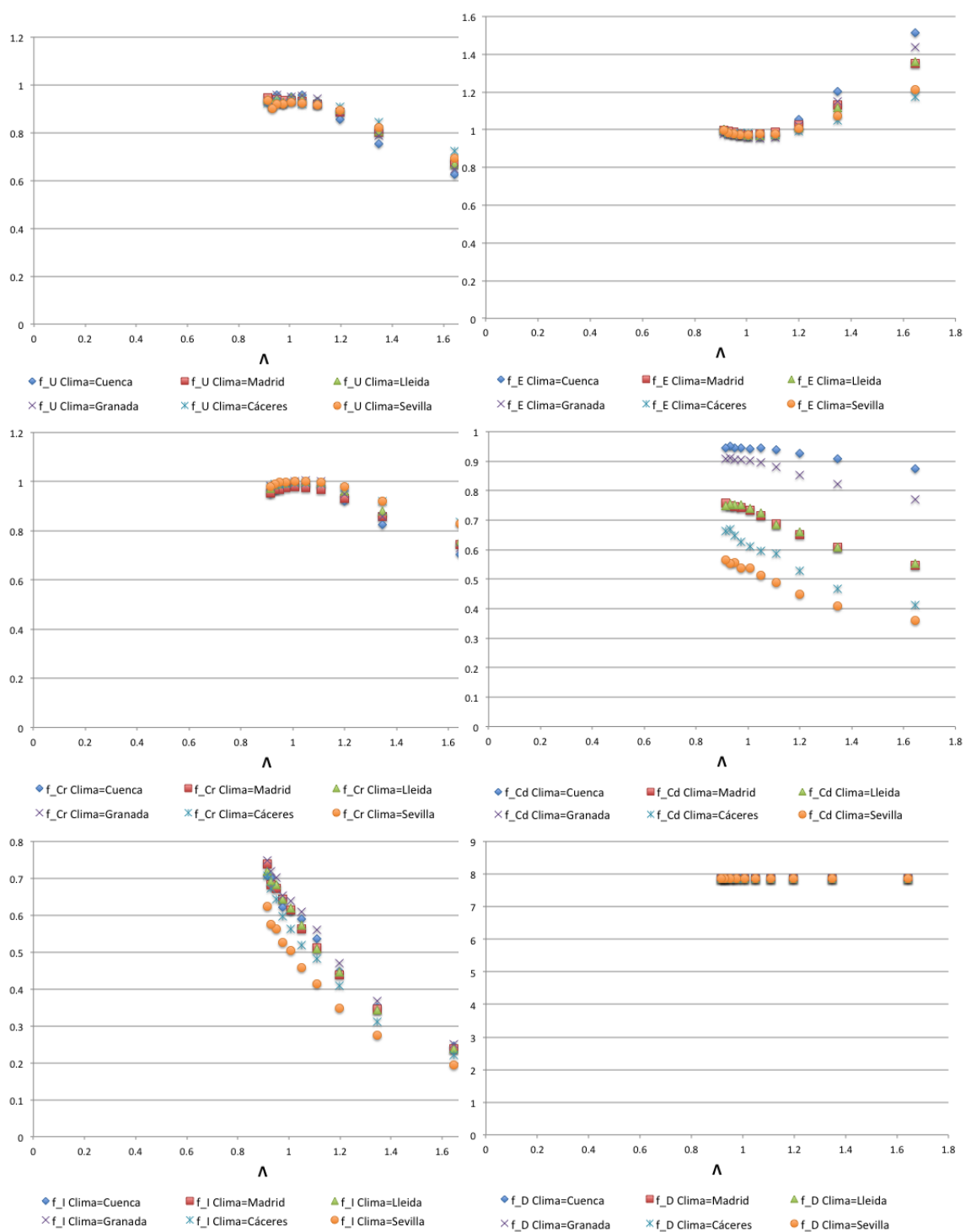


Figura A.27: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A3. clima variable

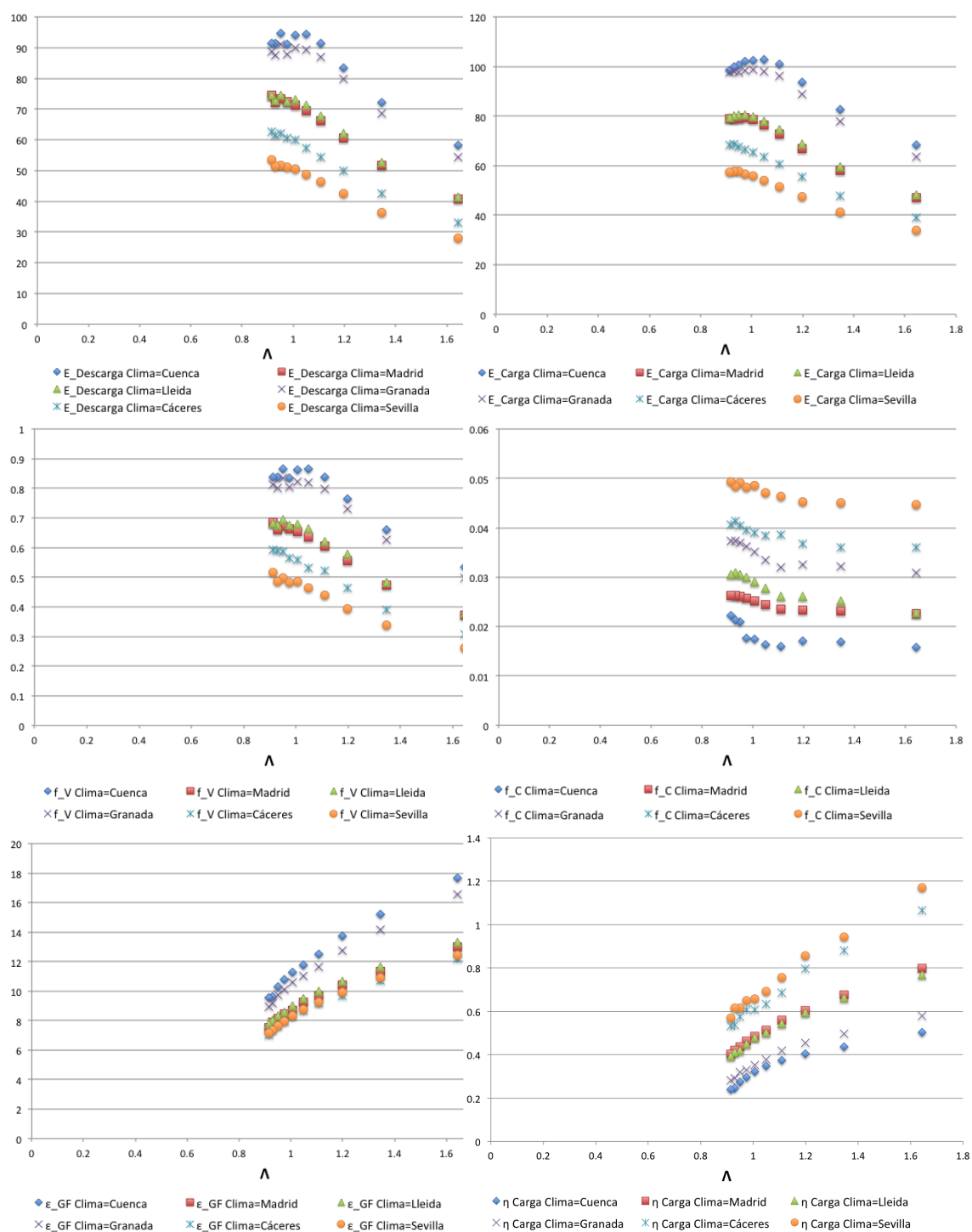


Figura A.28: Indicadores globales. Caso:A3. clima variable

#### A.2.4. Caso 4. Elemento exterior masivo, elemento interior ligero

La fachada correspondería con una de tipo industrializado pesado (paneles) o con un muro cortina de fábrica exterior. Este modelo se ajusta a un tipo de fachada innovadora (tipo Structura).

El muro exterior de fábrica está conectado con el edificio a través de unos elementos metálicos que transmiten las cargas horizontales impidiendo el movimiento de la hoja en esta dirección. La solución que se plantea en este caso presenta gran cantidad de aislamiento al interior con poca inercia. En la tabla A.4 se recoge la composición completa de la fachada simulada.

La figura A.29 muestra un esquema de la fachada.

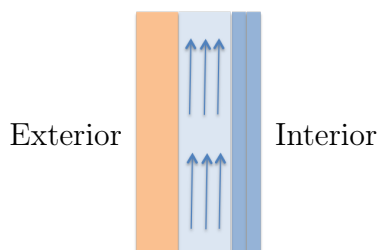


Figura A.29: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, elemento interior ligero.

Los resultados del caso se muestran gráficamente en las figuras A.30 y A.31 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.32 y A.33 para distintos climas.

Tabla A.4: Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, elemento interior ligero.

Elemento exterior: Fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Elemento interior: Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,08
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04

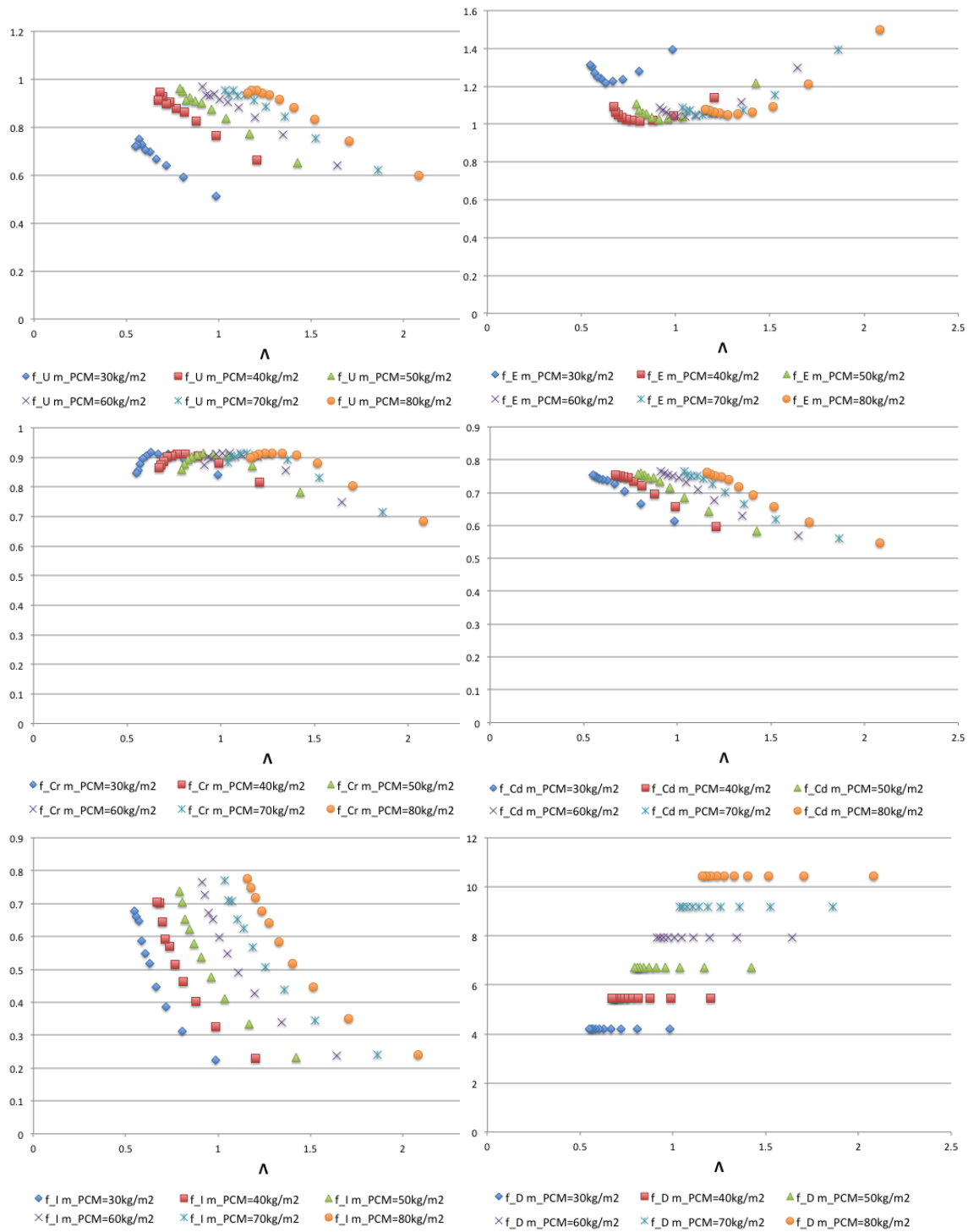


Figura A.30: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A4. PCM variable

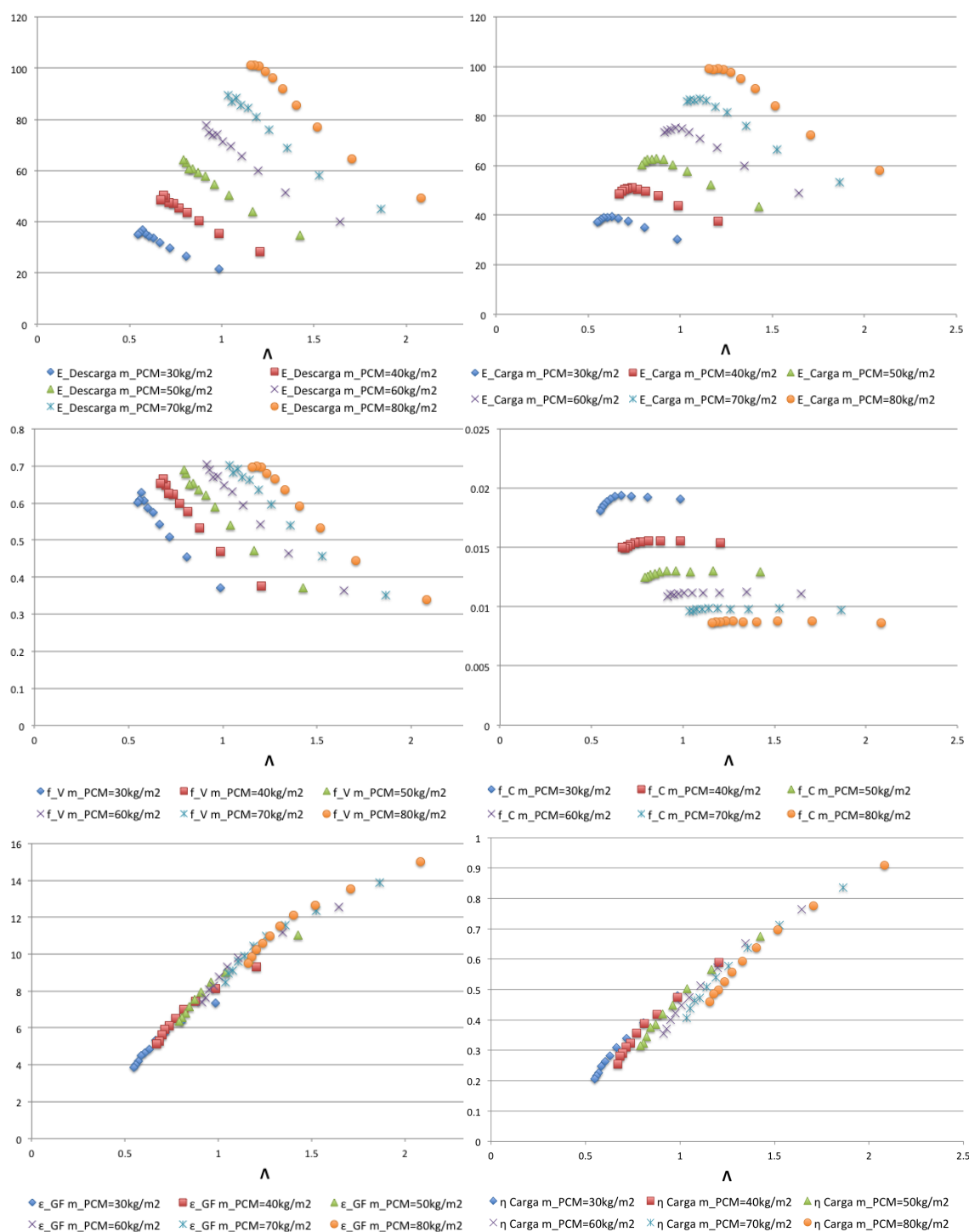


Figura A.31: Indicadores globales. Caso:A4. PCM variable

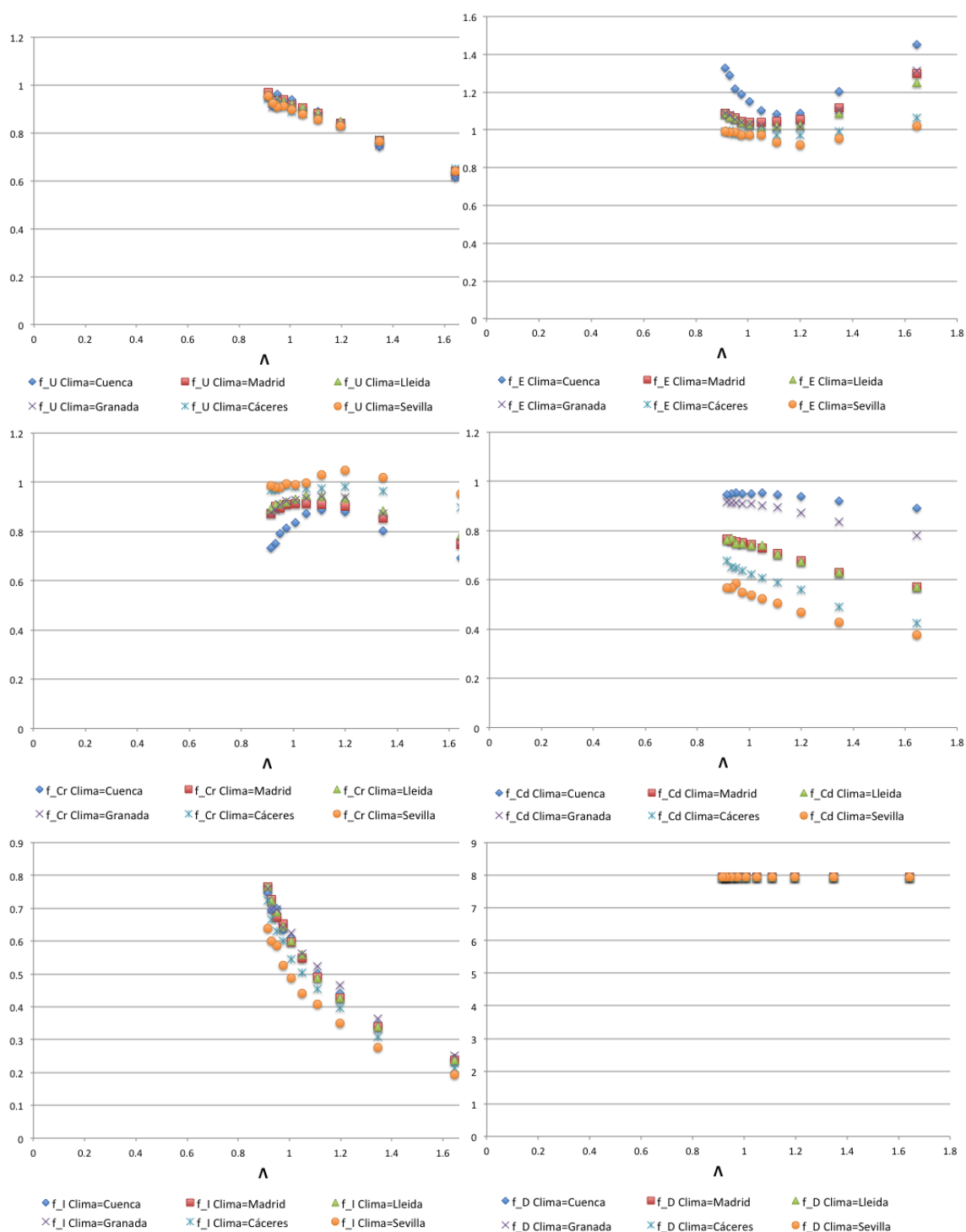


Figura A.32: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A4. climas variable



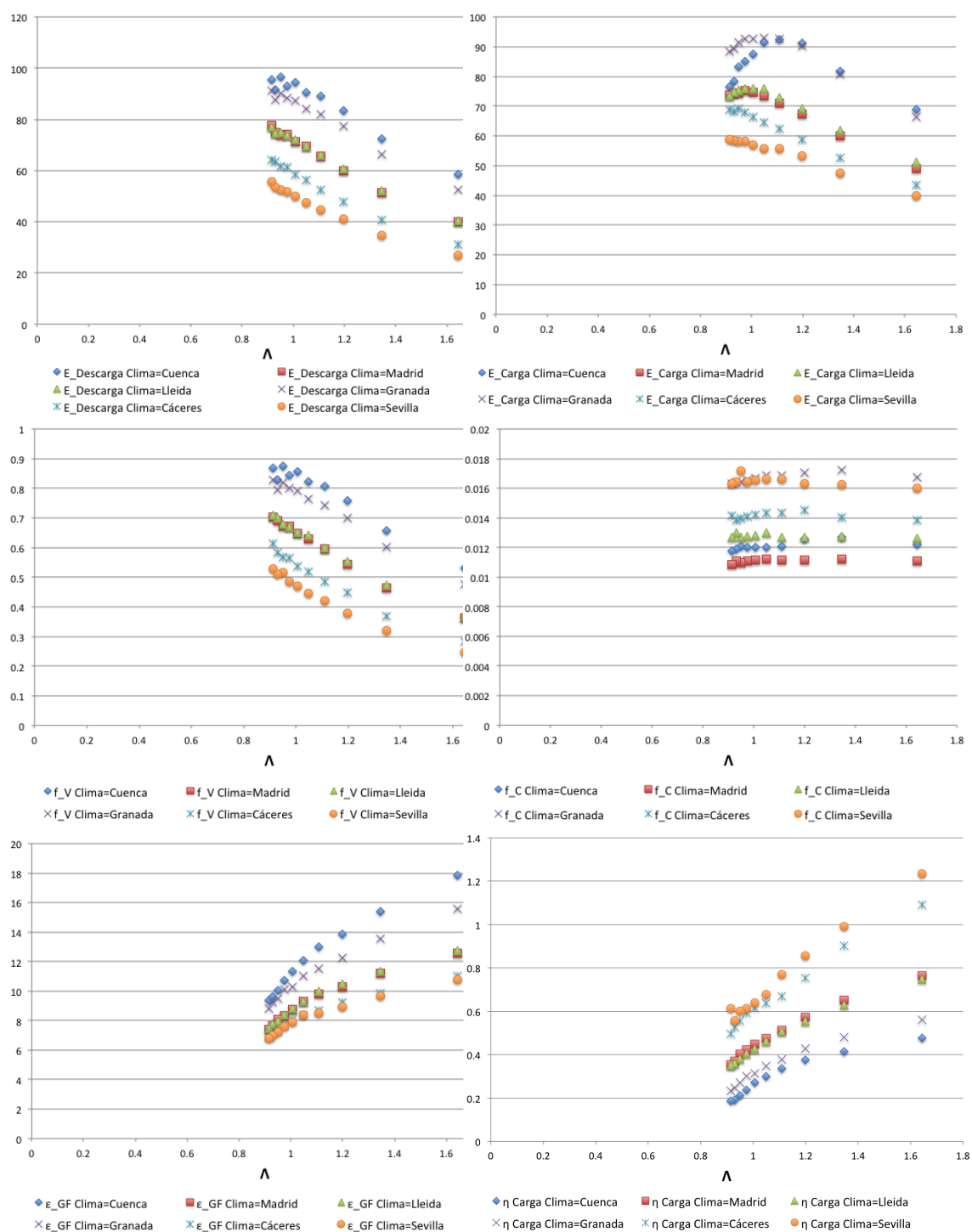


Figura A.33: Indicadores globales. Caso:A4. climas variable

### A.2.5. Caso 5. Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara

Esta fachada sería análoga al caso anterior pero más habitual desde el punto de vista de la construcción tradicional. En caso de rehabilitación consistiría en una solución SATE y una doble piel pesada. En la tabla A.5 se recoge la composición completa de la fachada simulada.

La figura A.34 muestra un esquema de la fachada.

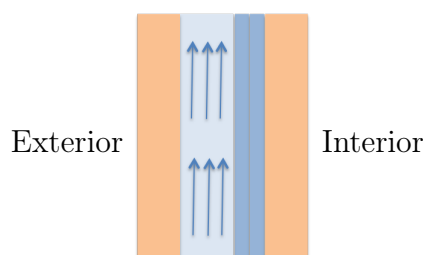


Figura A.34: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara.

Los resultados del caso se muestran gráficamente en las figuras A.35 y A.36 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.37 y A.38 para distintos climas.

Tabla A.5: Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara.

Elemento exterior: Fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Aislante exterior, hoja interior de fábrica	
Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,08
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Hoja interior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60

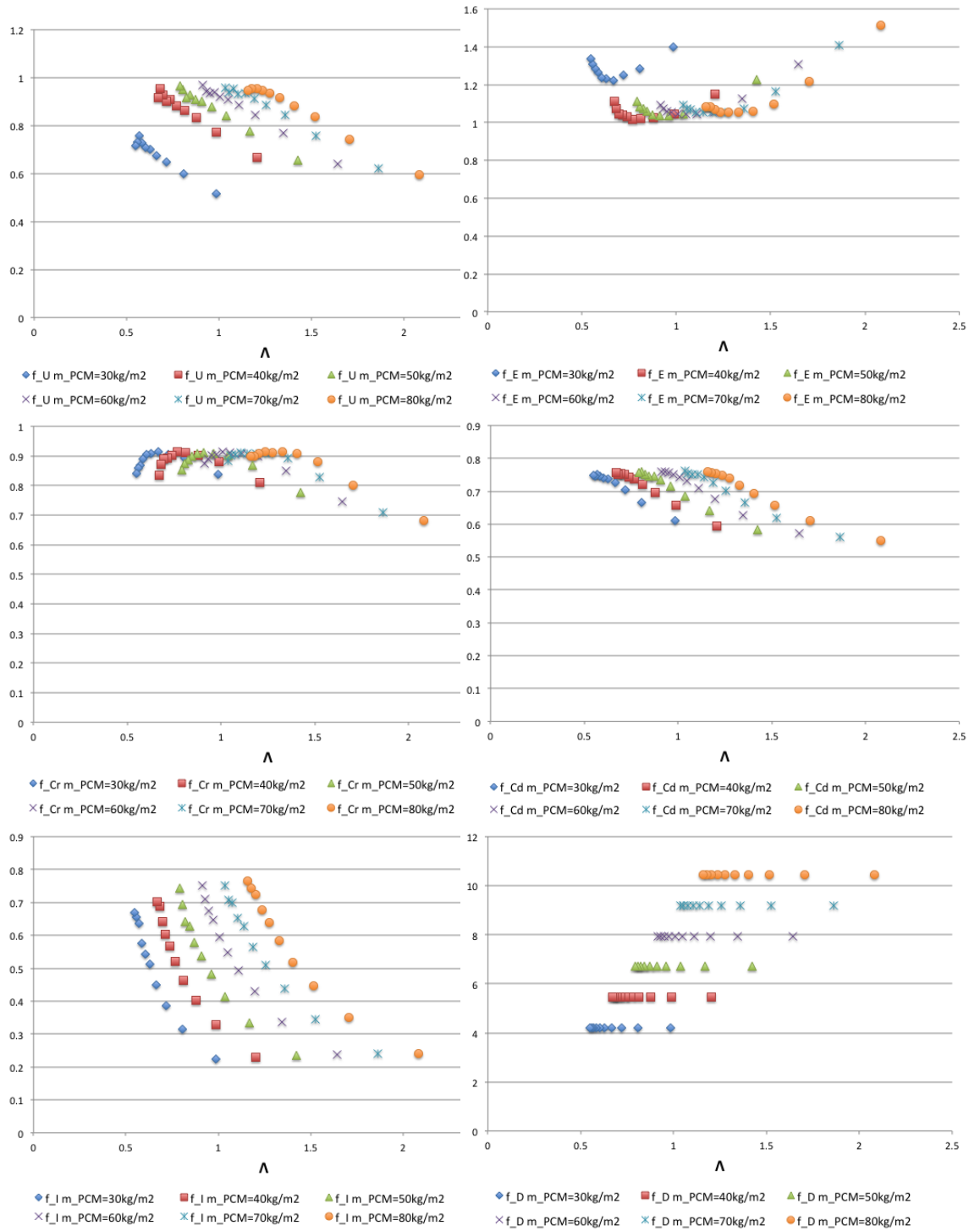


Figura A.35: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A5. PCM variable

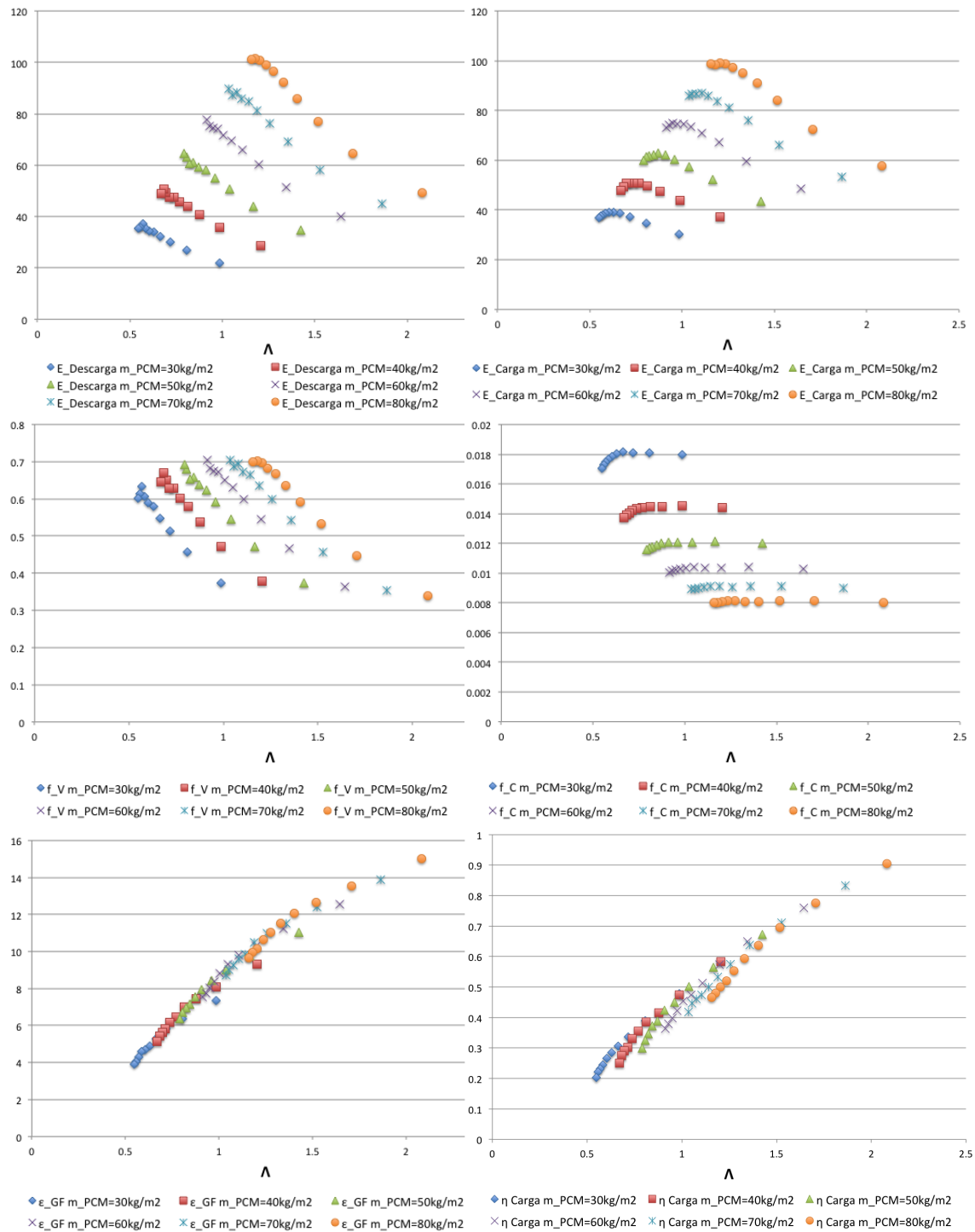


Figura A.36: Indicadores globales. Caso:A5. PCM variable

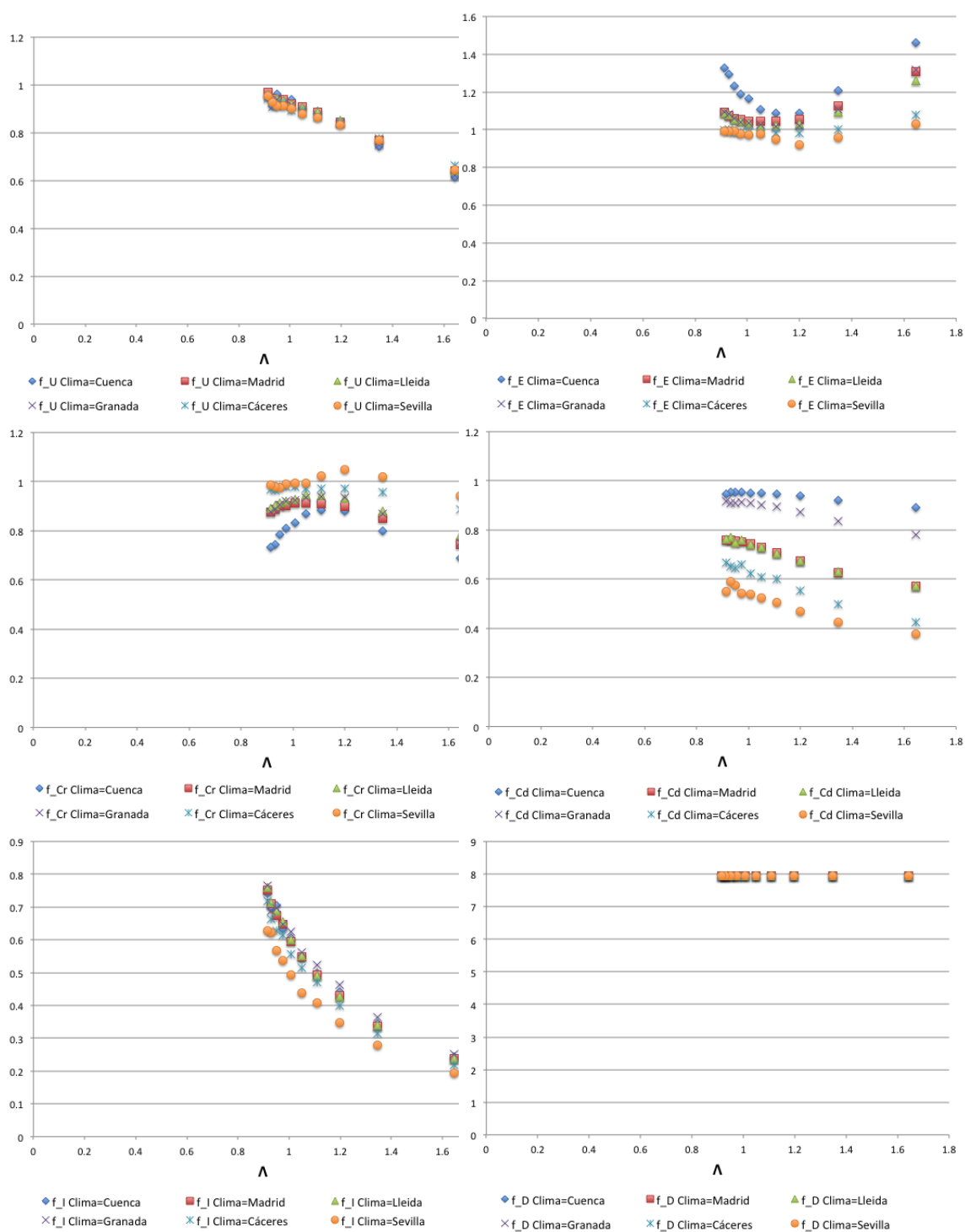


Figura A.37: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A5. clima variable

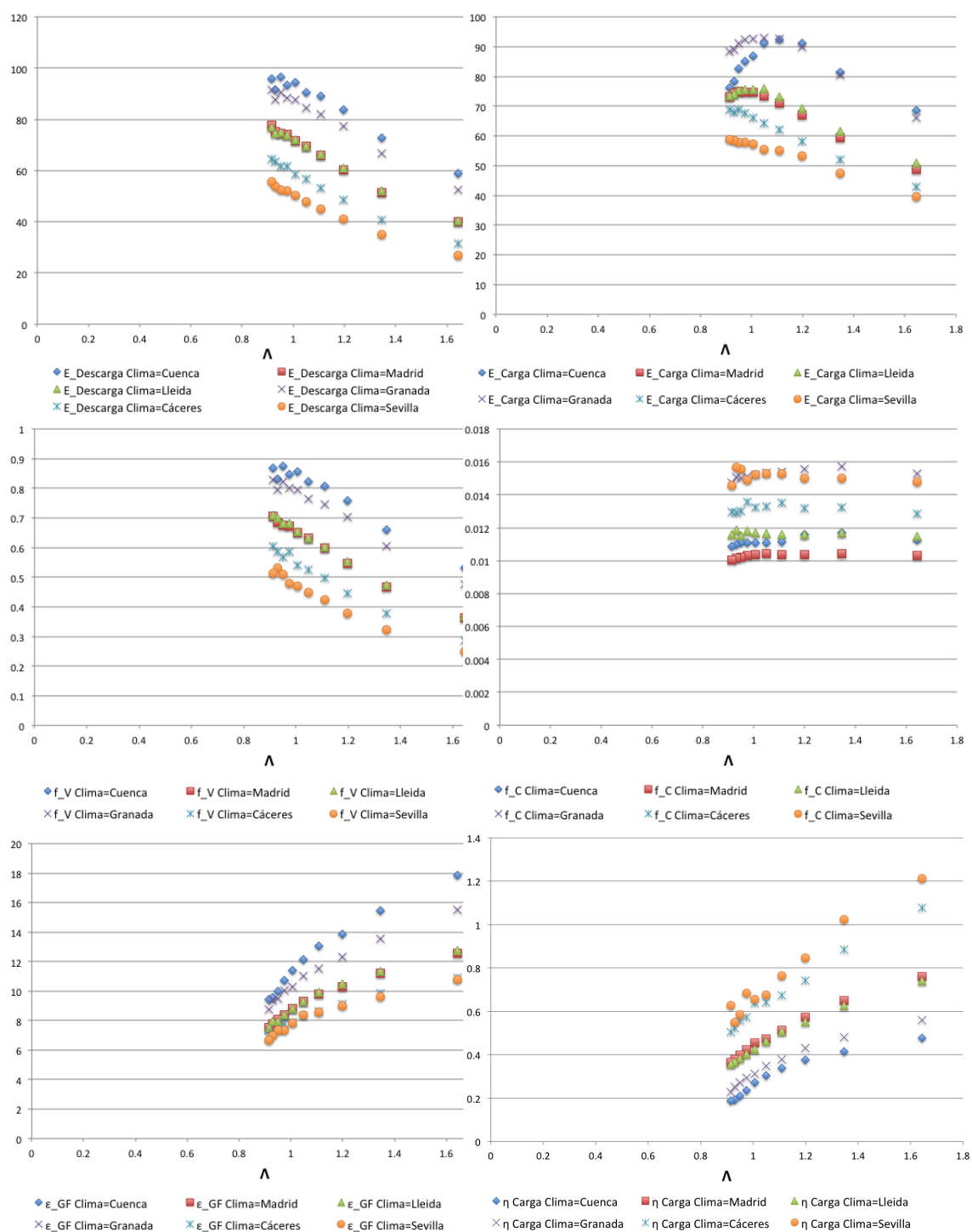


Figura A.38: Indicadores globales. Caso:A5. clima variable

### A.2.6. Caso 6. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara

La fachada es análoga a la del caso 4 y 5 en cuanto a nivel de aislamiento. La diferencia fundamental está en la disposición del aislante. Igualmente puede ser una solución de gran interés en rehabilitación.

Sería muy similar a las fachadas ventiladas tradicionales excepto en el ancho de la cámara y la disposición del aislante. En la tabla A.6 se recoge la composición completa de la fachada simulada.

La figura A.39 muestra un esquema de la fachada.

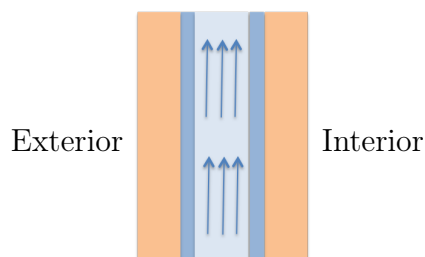


Figura A.39: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara.

Los resultados del caso se muestran gráficamente en las figuras A.40 y A.41 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.42 y A.43 para distintos climas.



Tabla A.6: Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, elemento interior masivo con aislante hacia la cámara.

Elemento exterior: Fábrica con aislamiento por el interior	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Aislante exterior, hoja interior de fábrica	
Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Hoja interior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60

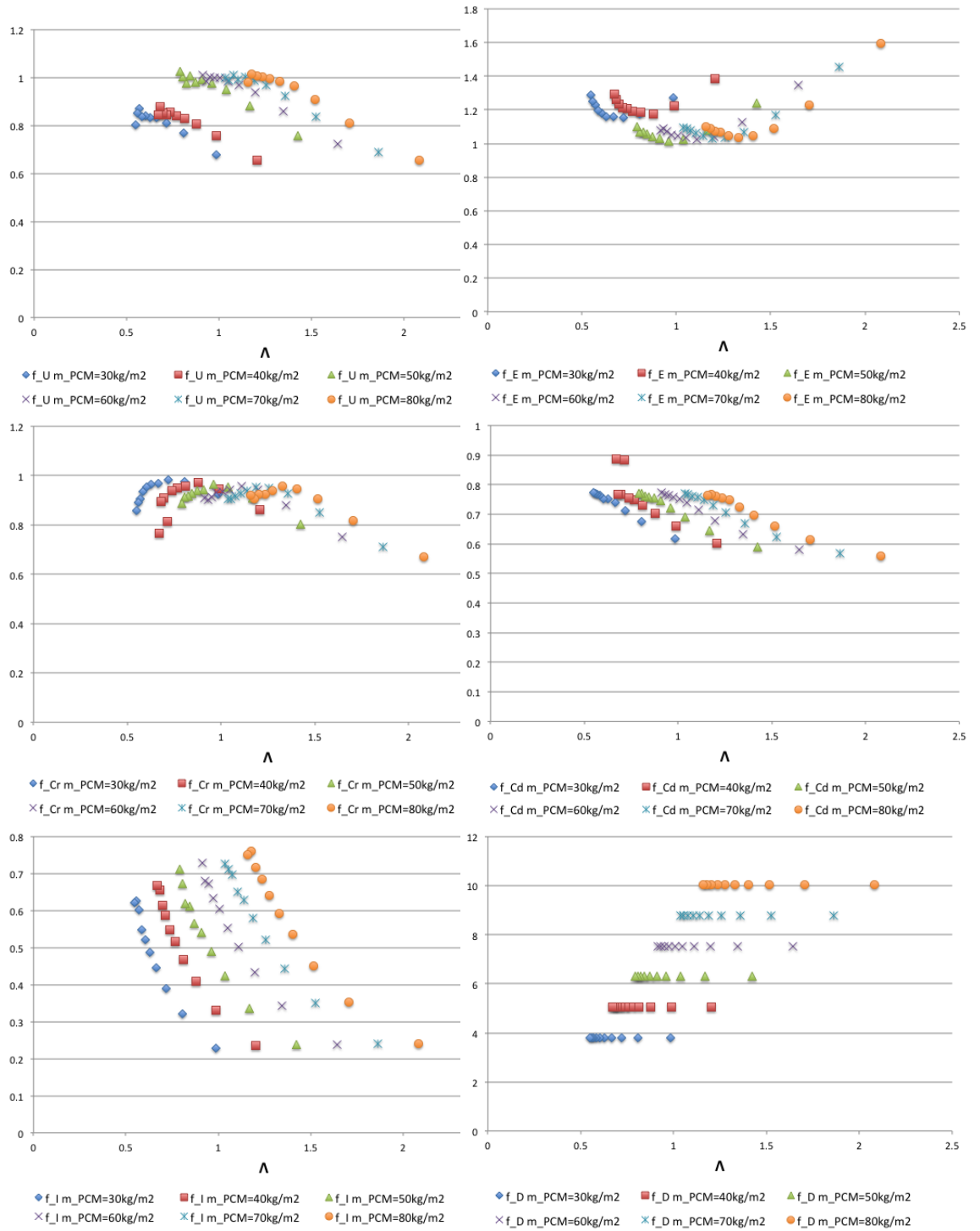


Figura A.40: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A6. PCM variable

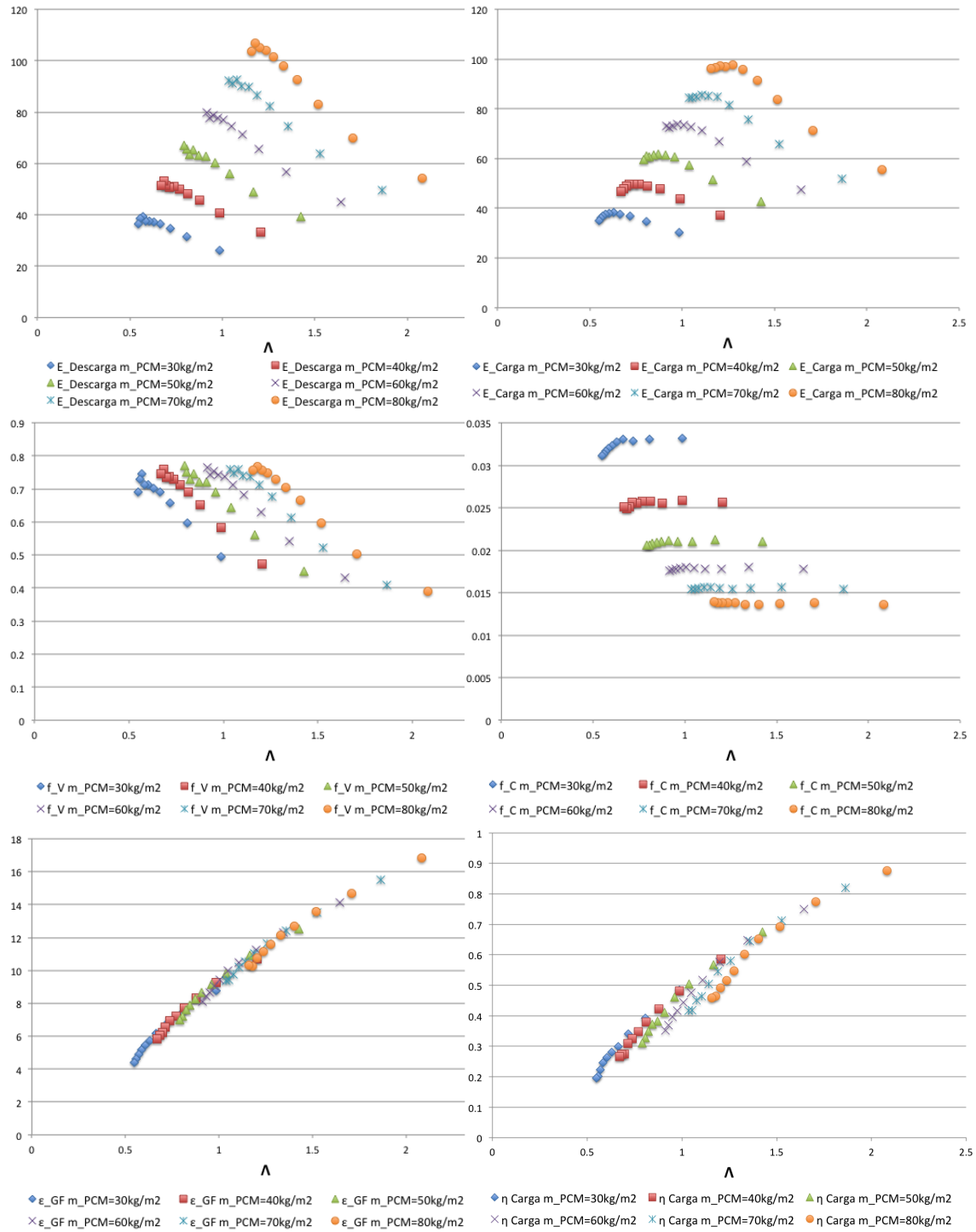


Figura A.41: Indicadores globales. Caso:A6. PCM variable

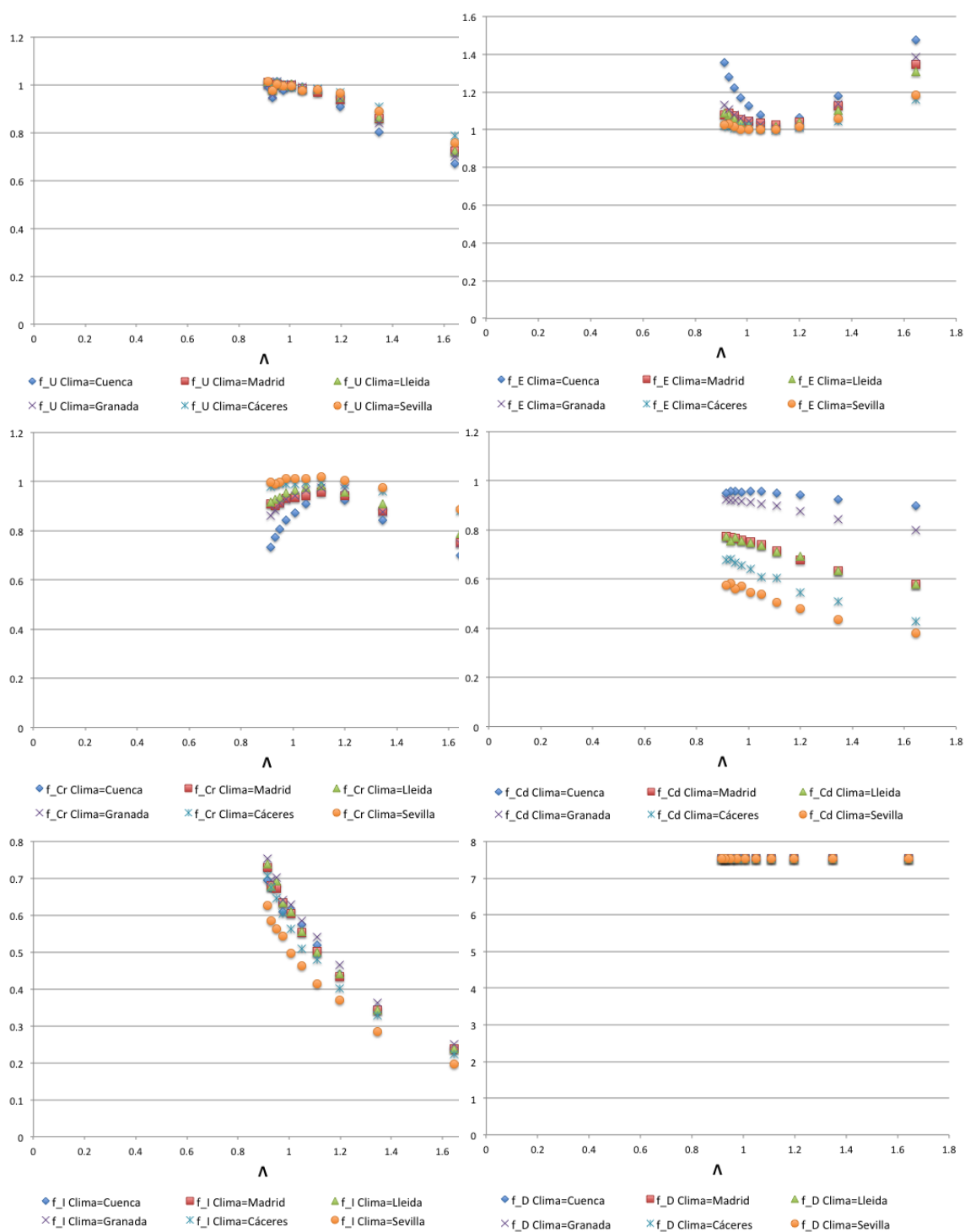


Figura A.42: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A6. clima variable

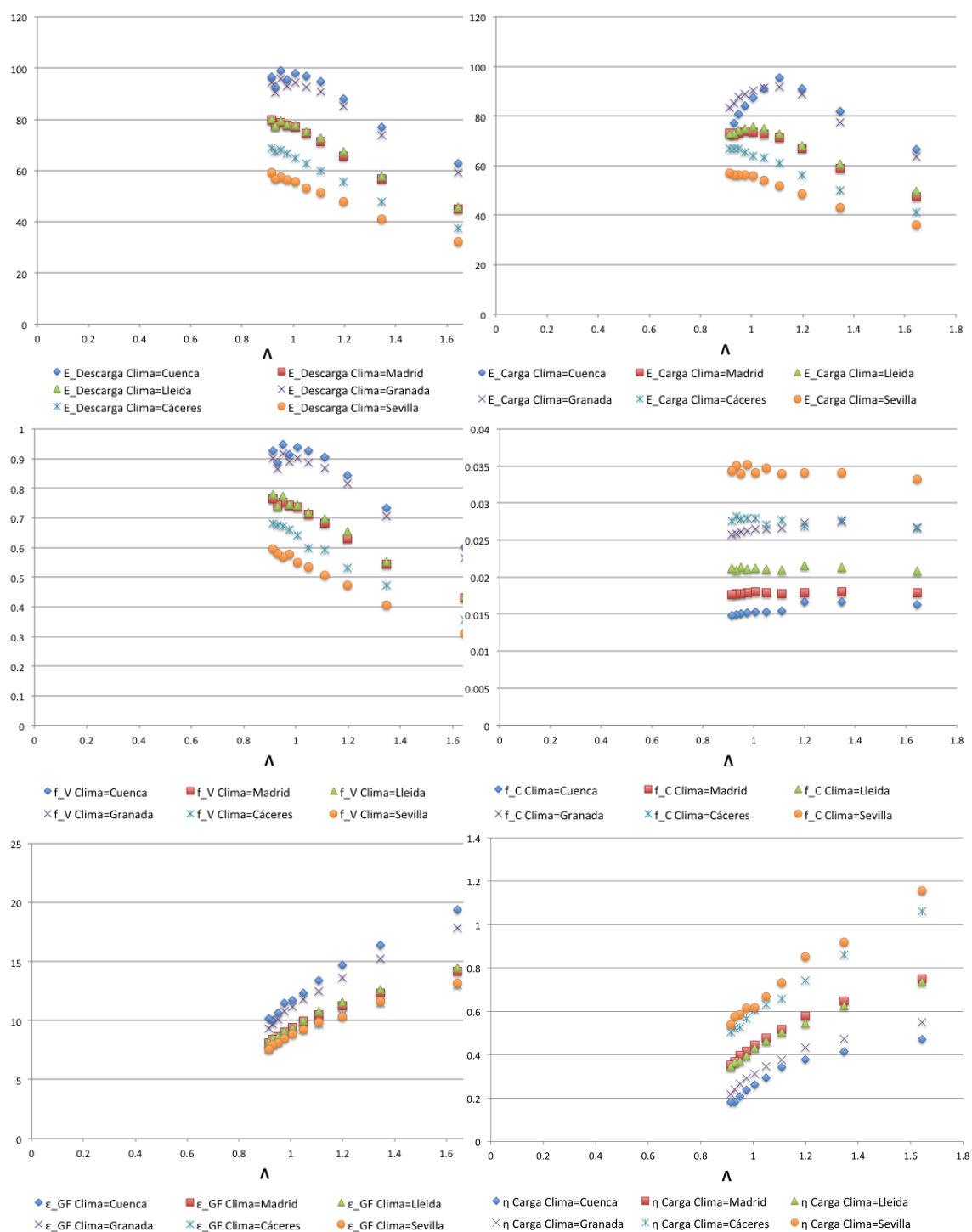


Figura A.43: Indicadores globales. Caso:A6. clima variable

### A.2.7. Caso 7. Elemento exterior masivo, muro interior masivo

Esta tipología se analiza para comprobar el comportamiento de fábricas existentes con una segunda piel masiva sin aislamiento. Correspondería con una fachada prefabricada o tipo Structura, similar a las anteriores. El muro interior se corresponde con una única hoja o varias al igual que el caso 3. Esta solución no conlleva aislamiento. En la tabla A.7 se recoge la composición completa de la fachada simulada.

La figura A.44 muestra un esquema de la fachada.

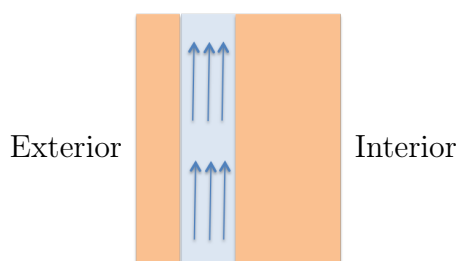


Figura A.44: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, muro interior masivo.

Los resultados del caso se muestran gráficamente en las figuras A.45 y A.46 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.47 y A.48 para distintos climas.

Tabla A.7: Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, muro interior masivo.

Elemento exterior: Fábrica.	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Hoja interior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,29
Densidad ( $kg/m^3$ )	1000
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,40

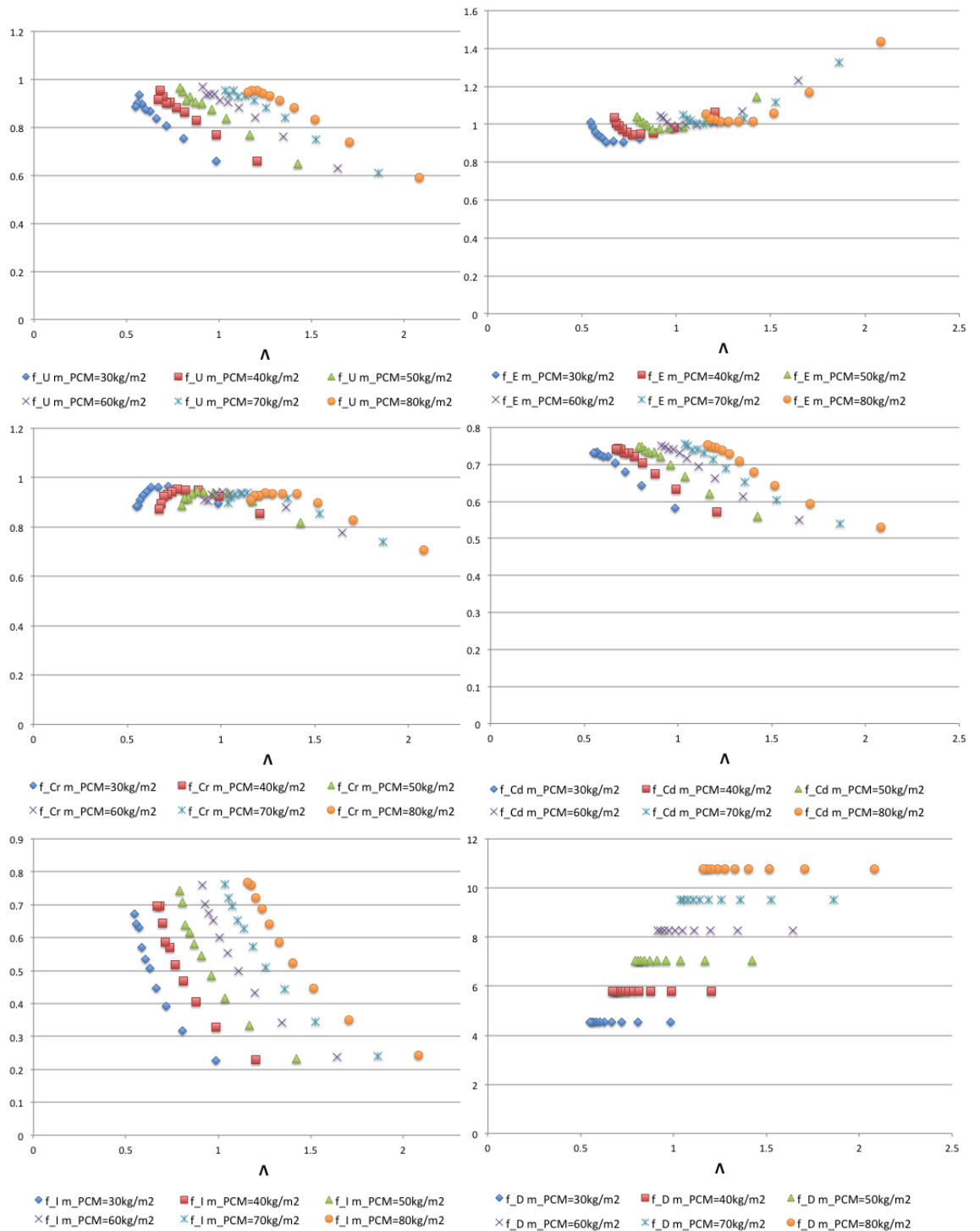


Figura A.45: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A7. PCM variable



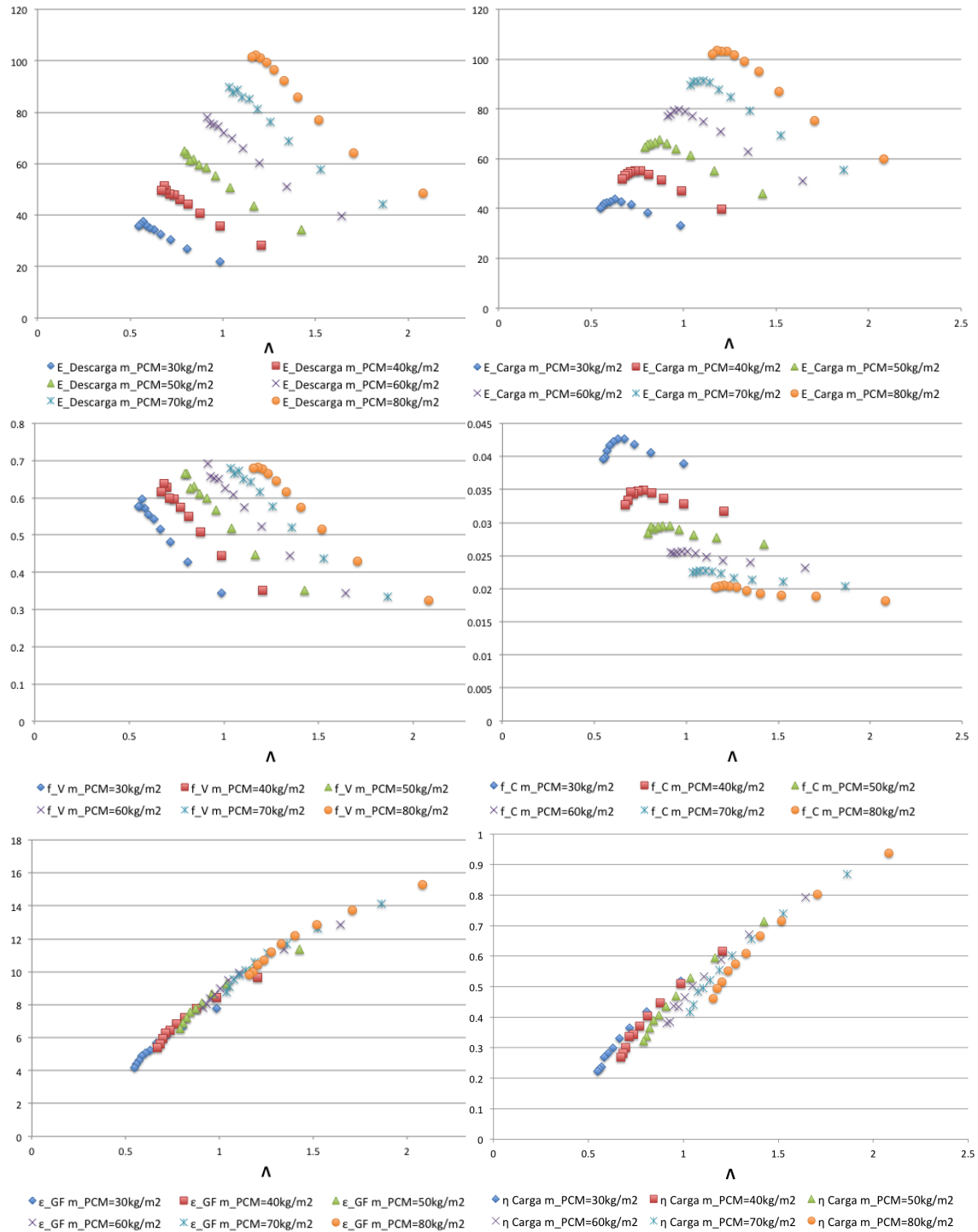


Figura A.46: Indicadores globales. Caso:A7. PCM variable

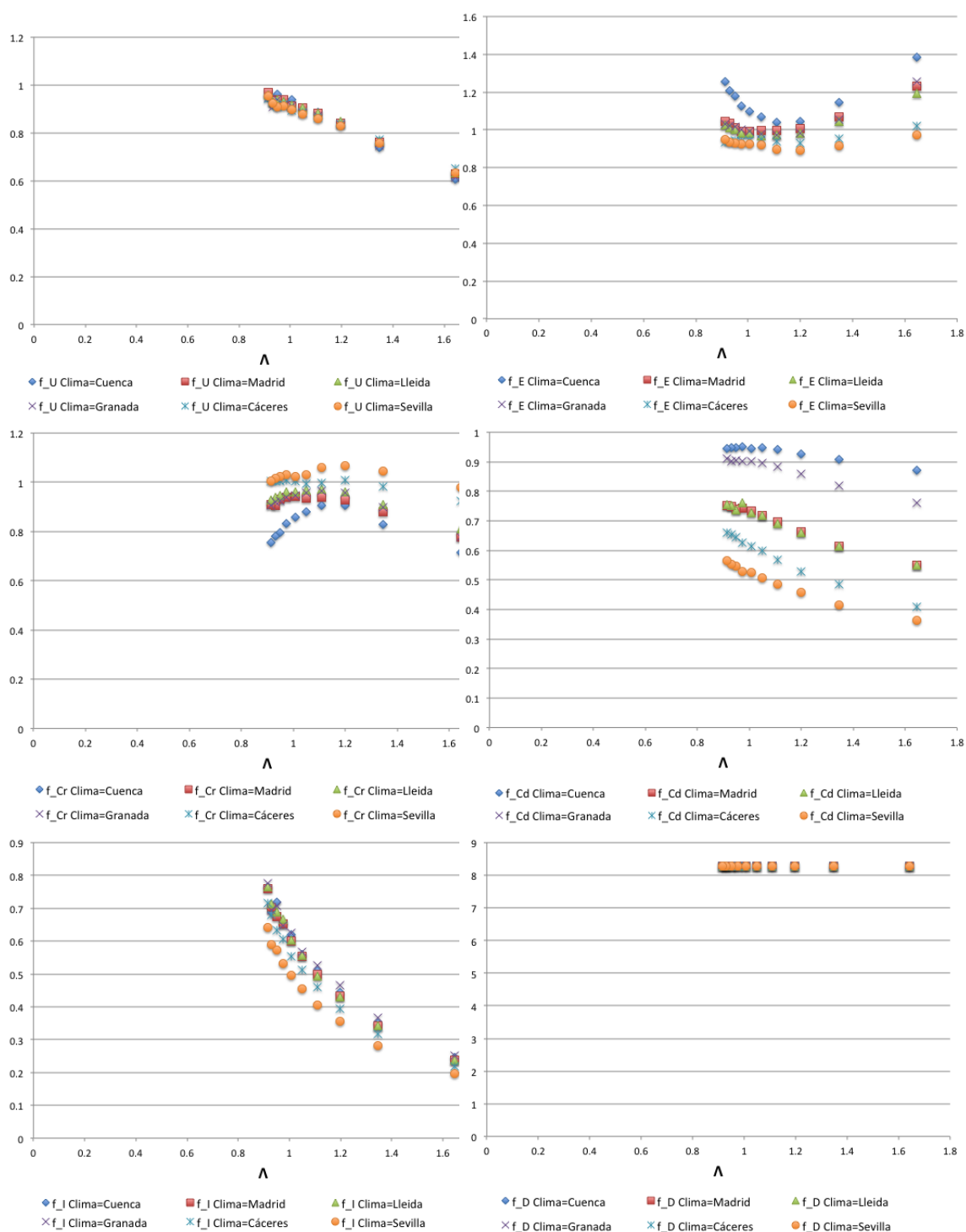


Figura A.47: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A7. clima variable

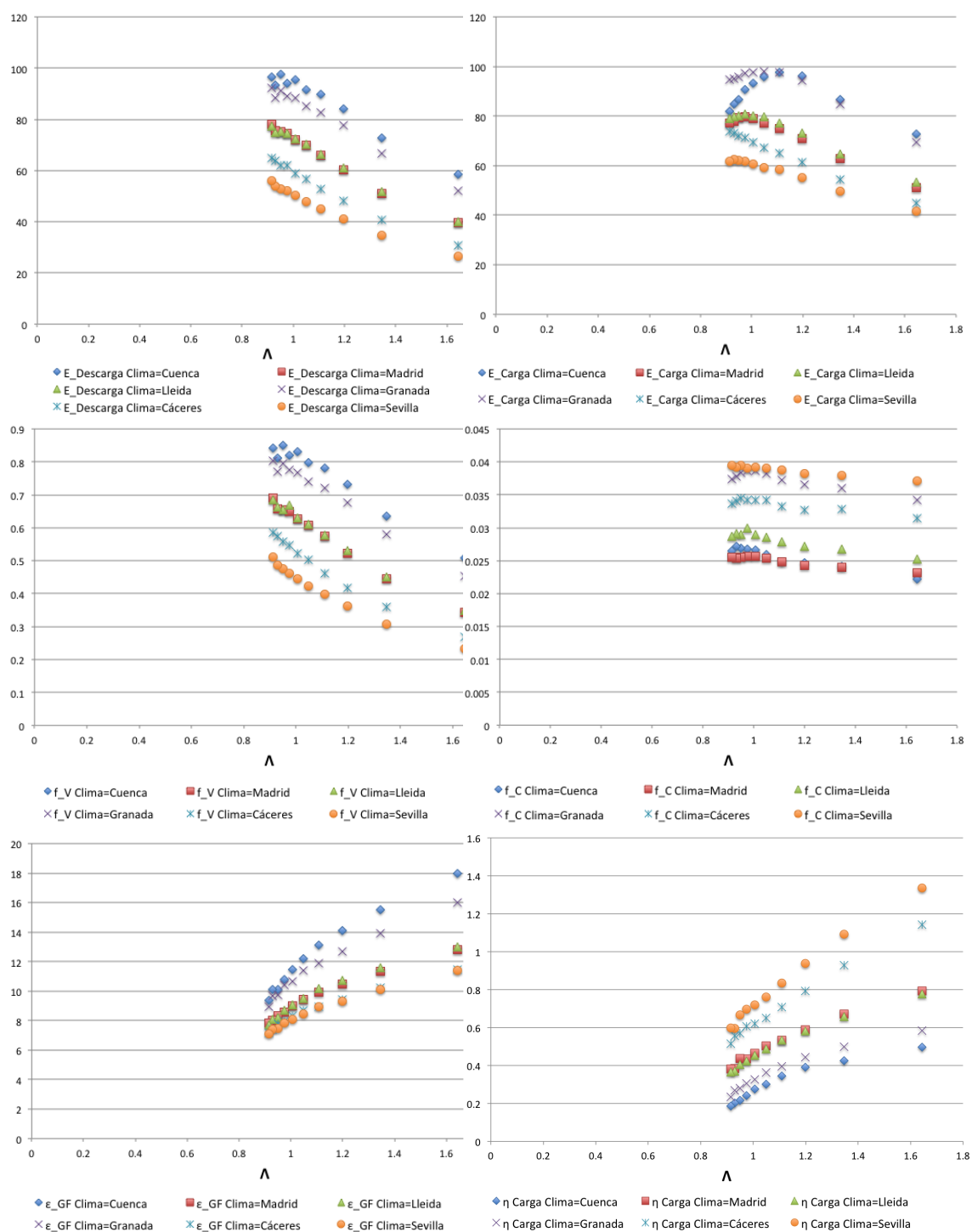


Figura A.48: Indicadores globales. Caso:A7. clima variable

### A.2.8. Caso 8. Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo

Esta tipología se analiza como una variedad de la anterior para comprobar la mejora del comportamiento de la cámara si se aísla el muro exterior por el interior de la cámara. En la tabla A.8 se recoge la composición completa de la fachada simulada.

La figura A.49 muestra un esquema de la fachada.

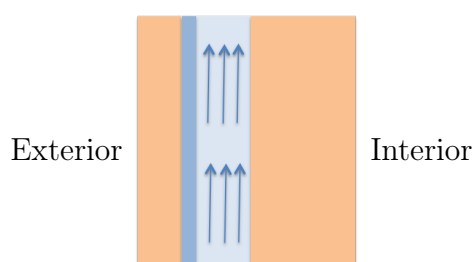


Figura A.49: Esquema de fachada compuesta por: Elemento exterior masivo con aislante hacia la cámara, muro interior masivo.

Los resultados del caso se muestran gráficamente en las figuras A.50 y A.51 para cantidad de PCM variable y en las figuras A.52 y A.53 para distintos climas.

Tabla A.8: Fachada compuesta por: Elemento exterior masivo, muro interior masivo.

Elemento exterior: Fábrica con aislamiento por el interior.	
Espesor ( $m$ )	0,12
Densidad ( $kg/m^3$ )	1200
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Absortividad ( $\alpha$ )	0,4
Aislante	
Espesor ( $m$ )	0,04
Densidad ( $kg/m^3$ )	100
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,04
Cámara de aire	
Espesor ( $m$ )	0,15
Altura ( $m$ )	3,80
Contenedores de PCM. Aletas	
Ancho ( $m$ )	0,30
Espesor ( $m$ )	0,01
Separación ( $m$ )	0,06
Masa PCM( $kg/m^2$ )	30 a 80
Material de cambio de fase. PCM	
Temperatura de cambio de fase ( $^{\circ}C$ )	22
Densidad sólido ( $kg/m^3$ )	1490
Densidad líquido ( $kg/m^3$ )	1430
Calor latente de cambio de fase ( $kJ/kg$ )	170
Calor específico ( $kJ/kg \cdot K$ )	2,22
Conductividad térmica sólido ( $W/m \cdot K$ )	0,60
Conductividad térmica líquido ( $W/m \cdot K$ )	1,00
Muro interior: Hoja interior de fábrica	
Espesor ( $m$ )	0,29
Densidad ( $kg/m^3$ )	1000
Calor específico ( $J/kg \cdot K$ )	1000
Conductividad térmica ( $W/m \cdot K$ )	0,40

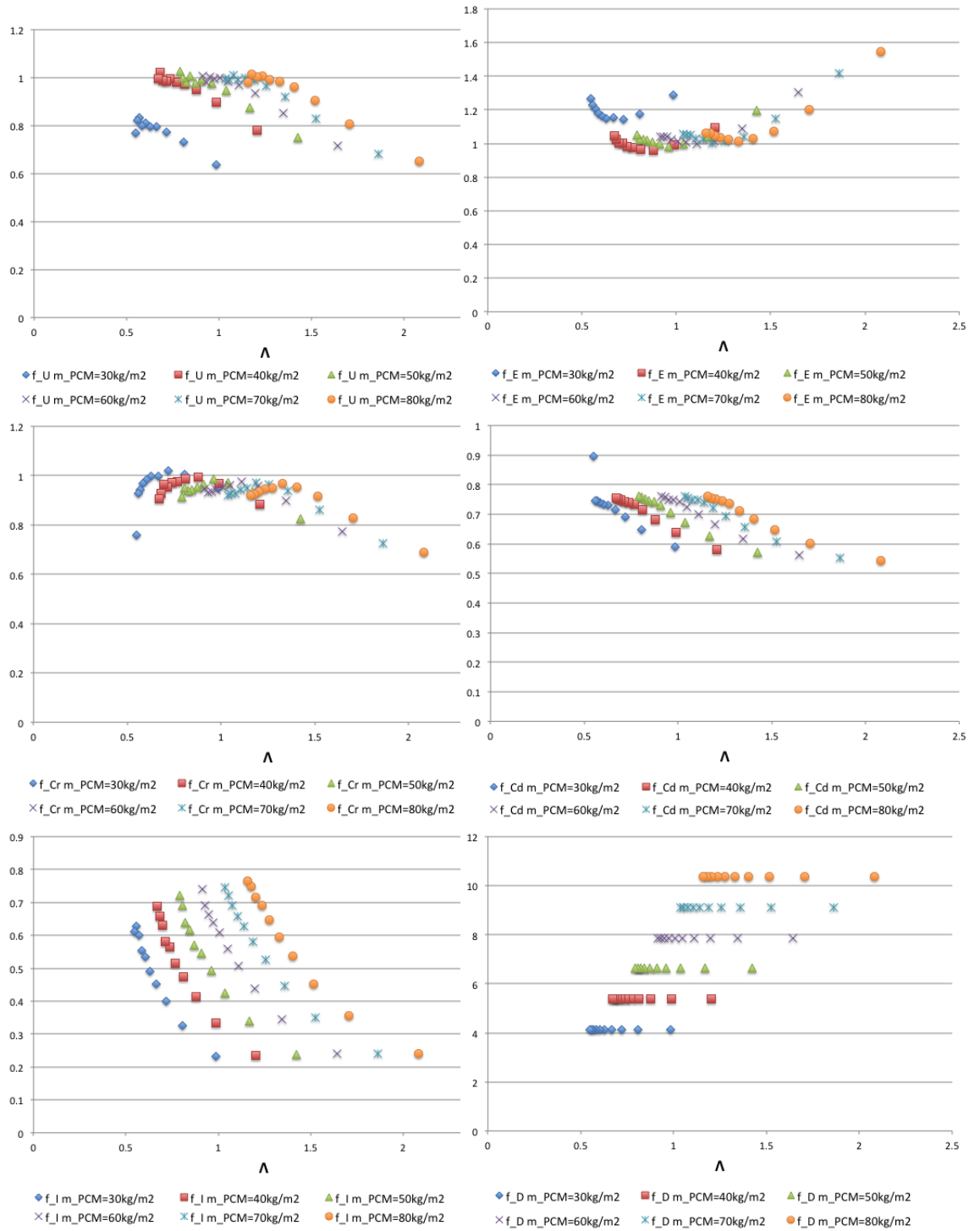


Figura A.50: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A8. PCM variable

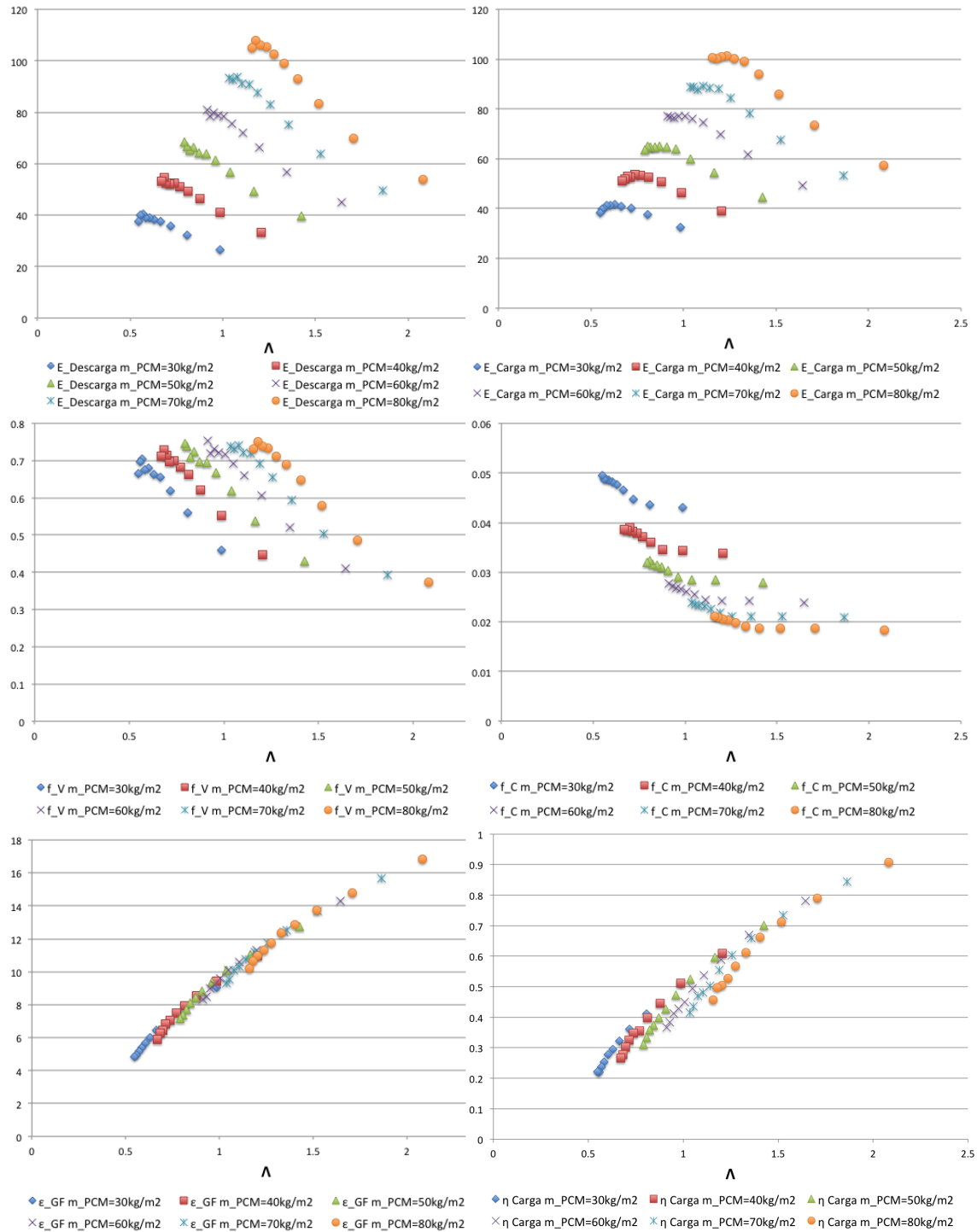


Figura A.51: Indicadores globales. Caso:A8. PCM variable

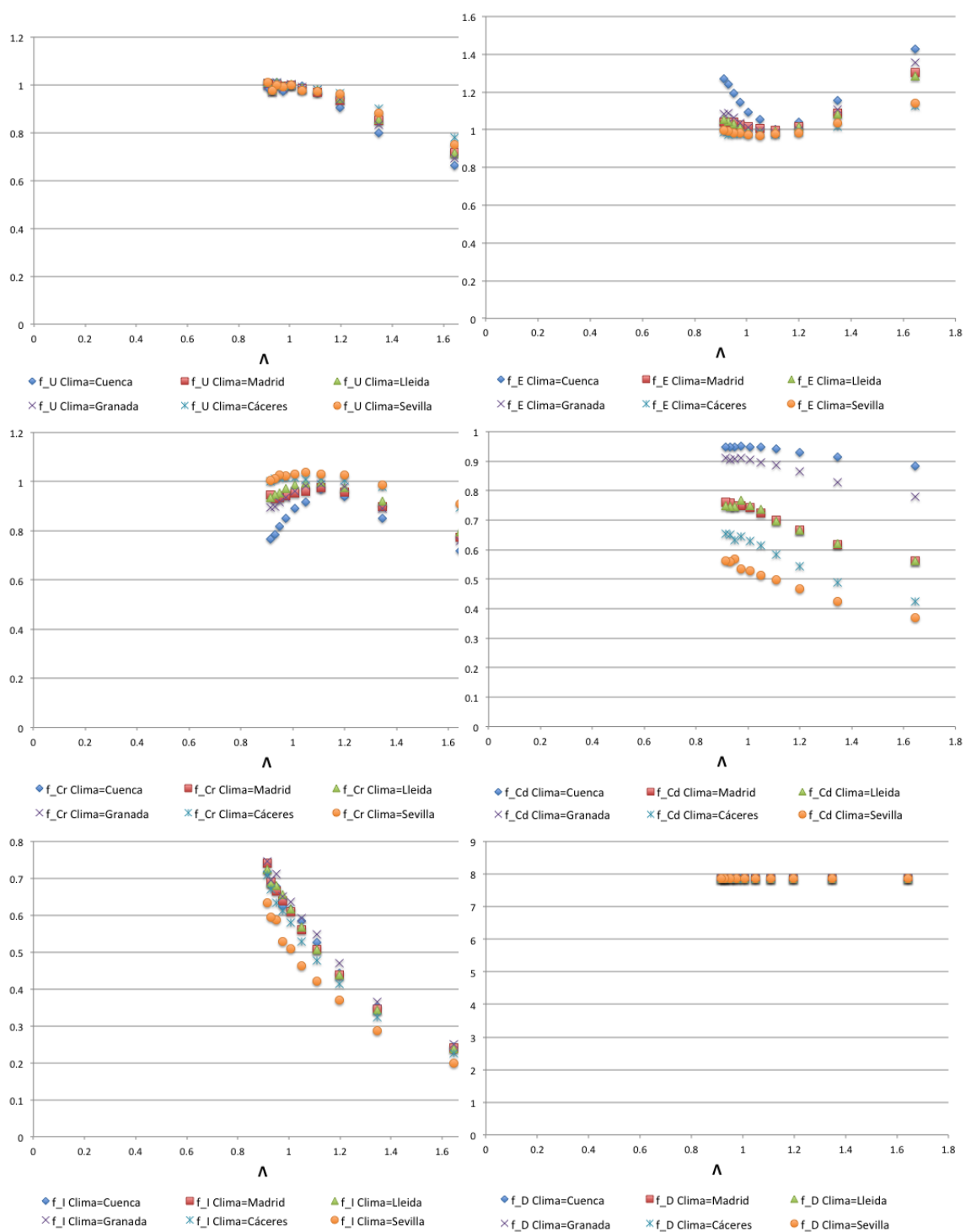


Figura A.52: Resultados del cálculo de indicadores. Caso:A8. clima variable



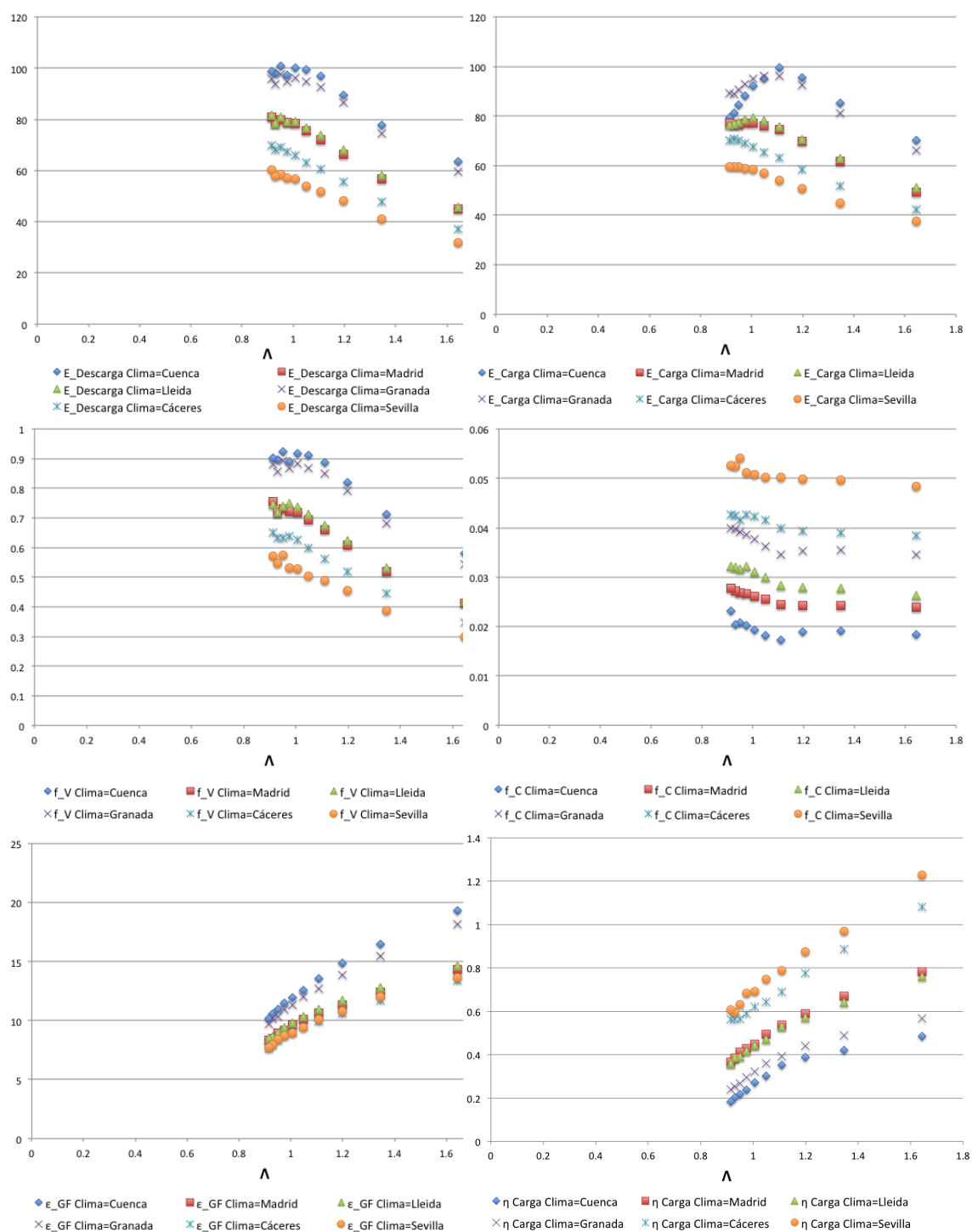


Figura A.53: Indicadores globales. Caso:A8. clima variable



# Apéndice B

## Climatología

### B.1. Potencial climático

El clima en la reglamentación se tiene en cuenta a través de la severidad climática definida como el cociente entre la demanda energética de un edificio en una localidad y la correspondiente al mismo edificio en una localidad de referencia. En España se toma Madrid como localidad de referencia, siendo por tanto su severidad climática la unidad. Se define una severidad climática de verano (SCV) y otra de invierno (SCI). En la figura B.1, se representan las capitales de provincia en función de la SCI y SCV.

Sin entrar en detalles del cálculo de la severidad climática, para estudiar el potencial de los sistemas de almacenamiento de energía mediante elementos de cambio de fase es preciso estudiar y clasificar las localidades españolas desde el punto de vista de su clima.

En la nueva reglamentación energética CTE 2013, se han definido un conjunto de climas sintéticos como representativos de las zonas climáticas para el cálculo de la demanda y consumo de los edificios. Aparecen unos nuevos climas  $\alpha$  para la Comunidad Canaria. Con estos nuevos climas no se trata de modelar con precisión el comportamiento del edificio, son climas reglamentarios para la verificación de las exigencias del Código Técnico y para la Certificación energética de los edificios. Los nuevos climas tendrán incidencia en el diseño y dimensionado de los edificios nuevos y de las rehabilitaciones importantes.

Dado que el objetivo de este estudio es evaluar el potencial climático en relación con la tecnología de cambio de fase se seguirá haciendo uso de los

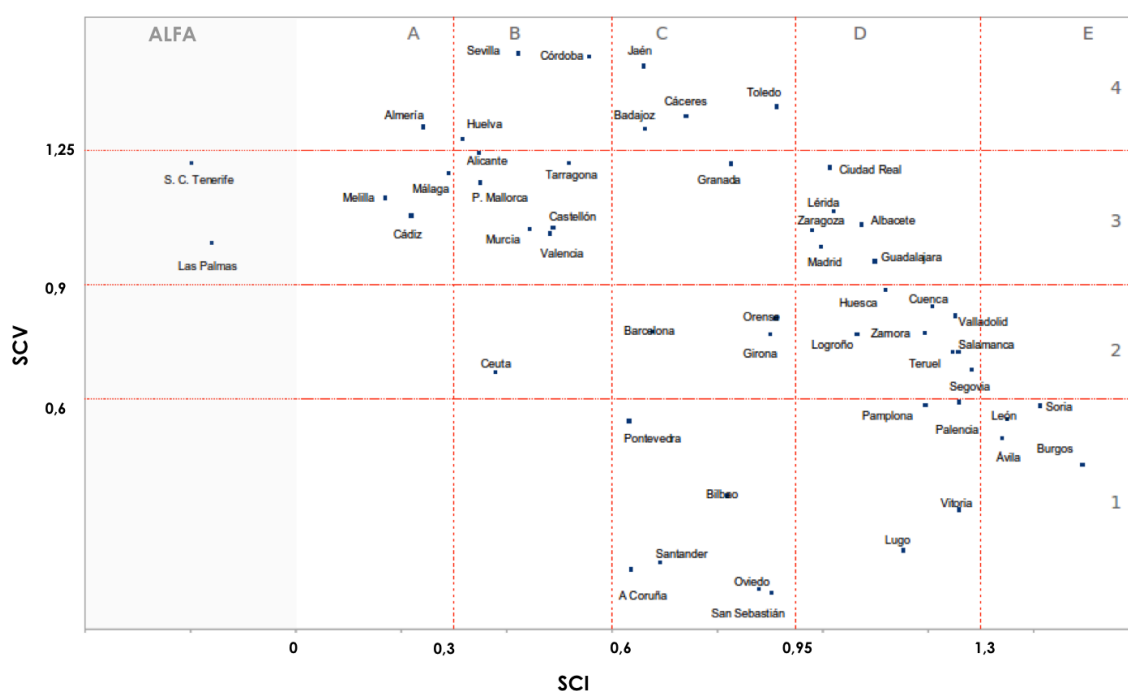


Figura B.1: Gráfico de zonas y severidades climáticas de capitales de provincia de España

climas por localidades para elegir una muestra con la que efectuar los cálculos. La muestra no trata de ser representativa del clima en España sino se escogerá a fin de servir de base en la comprobación de las tendencias en función del clima.

Para estudiar el clima se define la siguiente variable:

Potencial de carga  $Pot_{Carga} (GH)$  como el producto del número de horas en las que la temperatura exterior es inferior al de una temperatura de referencia por el valor de la temperatura de referencia menos la temperatura exterior. La temperatura de referencia será la de fusión del PCM.

Si se representa gráficamente el potencial climático se observa que, para temperaturas de fusión bajas, el clima de los meses estivales es incapaz de activar el PCM en buena parte de las localidades, por lo que el sistema no será eficaz al no producirse la carga. Para temperaturas de fusión altas de

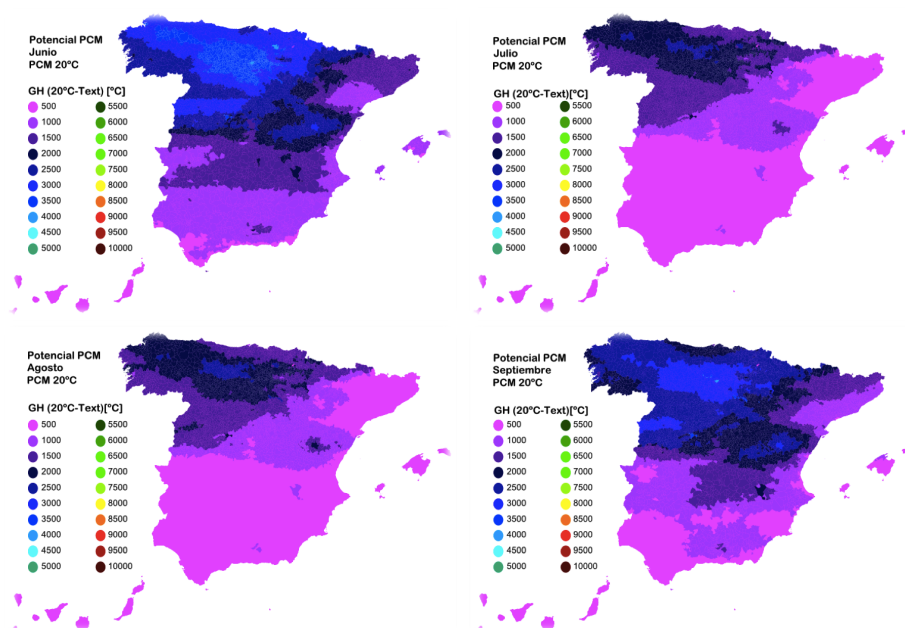


Figura B.2: Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 20 °C

PCM se observa claramente el aumento del potencial. En estos casos la tecnología podría servir de apoyo a sistemas de climatización, como por ejemplo para el enfriamiento previo del caudal de renovación.

En las figuras B.2, B.3, B.4, B.5 y B.6 se representa el cálculo de la variable  $Pot_{Carga} (GH)$  que muestra el potencial de uso de PCM para distintas temperaturas de fusión en los meses de junio, julio, agosto y septiembre.

El potencial definido anteriormente puede servir de referencia para estimar la cantidad de energía que se puede almacenar y liberar mediante la tecnología del almacenamiento con materiales PCM. Este parámetro es muy variable de unos meses a otros y entre localidades.

A los efectos del estudio de clima, el Potencial no tiene en cuenta la franja horaria en la que se puede producir la carga y la descarga. Es decir el Potencial de carga no indica si existirá una necesidad de descarga. Es obvio afirmar que los mayores potenciales se producirán en las épocas en los que no existirá demanda de refrigeración, o dicho de forma sencilla el Potencial marca la cantidad de "frío" disponible, siempre mayor en la noche.

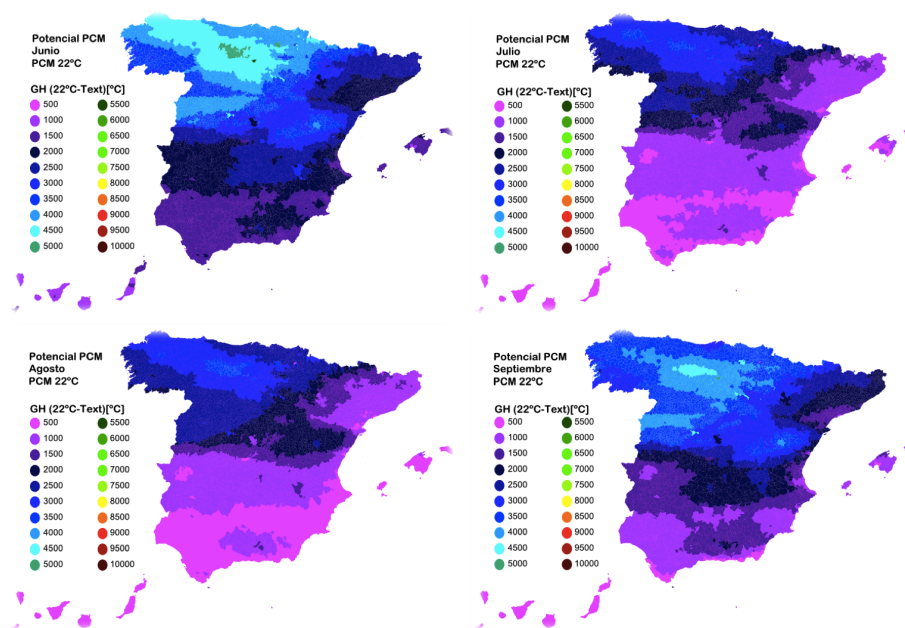


Figura B.3: Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 22 °C

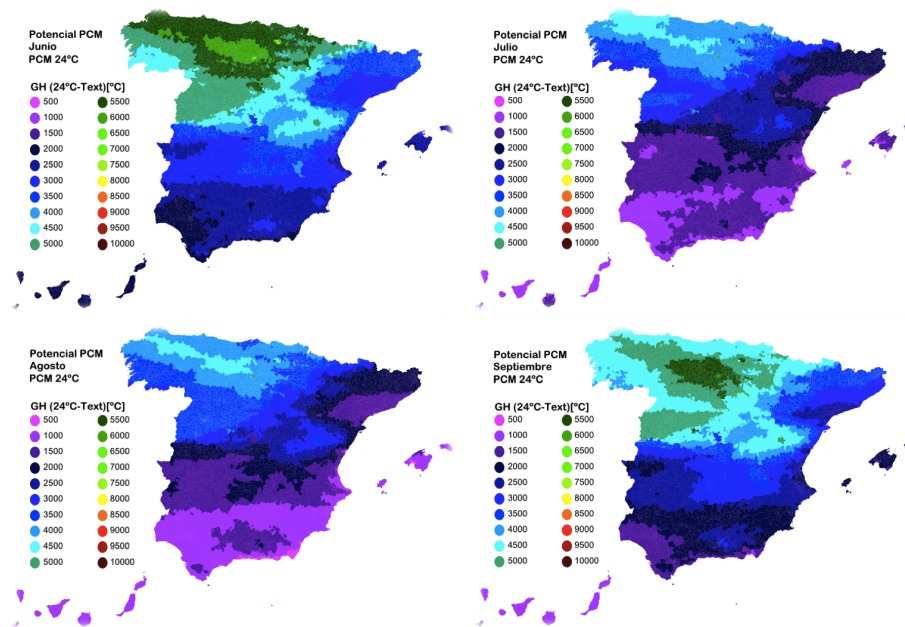


Figura B.4: Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 24 °C

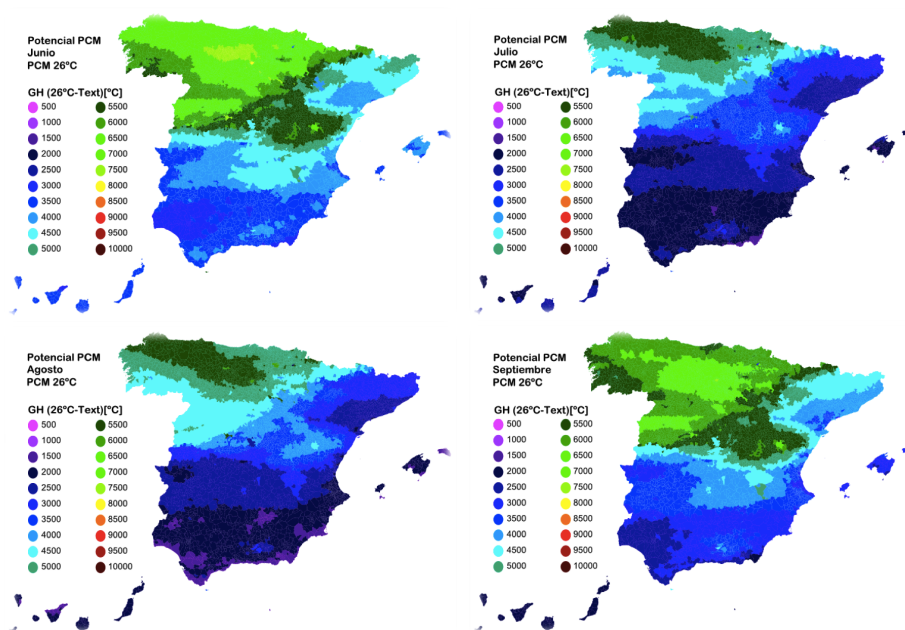


Figura B.5: Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 26 °C

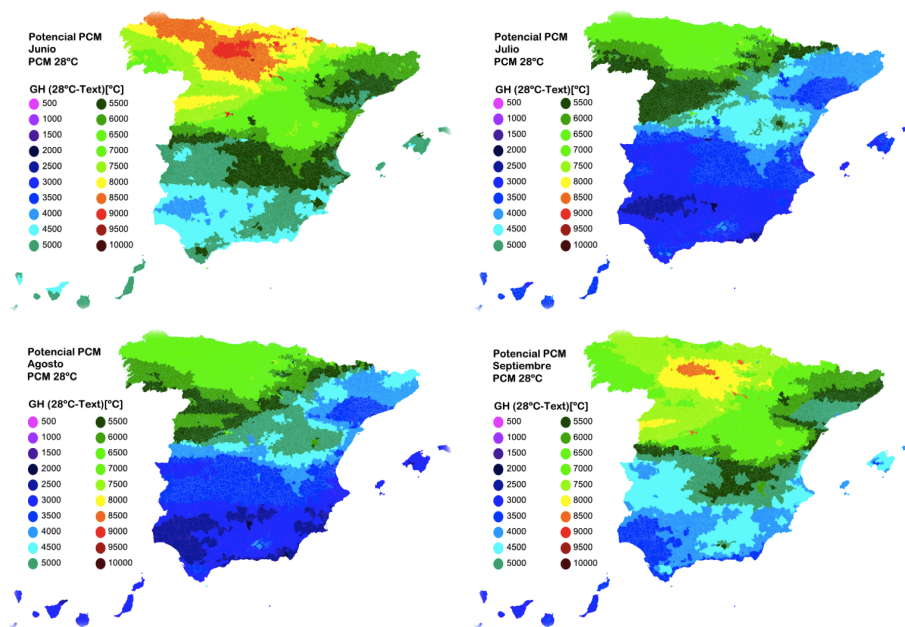


Figura B.6: Mapas de potencial de enfriamiento con PCM. Temperatura de fusión 28 °C

En sistemas asistidos en los que es necesario el uso de elementos para la ventilación es además necesario, para tener una buena eficiencia, que la carga se produzca en el intervalo horario del día en el que el gradiente térmico sea mayor. Se puede por ello definir un segundo parámetro Potencial de carga restringido  $PotR_{Carga} (GH)$ , que indique lo mismo que el  $Pot_{Carga} (GH)$  pero restringido a un intervalo horario prefijado.

Calcular un parámetro similar en descarga carece de utilidad salvo como orden de magnitud dado que el consumo de los edificios está relacionado con el clima pero también con diseño y sobre todo con el uso del edificio. En cualquier caso conocer el parámetro  $GD$  de refrigeración para los meses estivales resulta interesante para verificar si existirá "demanda" o no de refrigeración a partir de una temperatura, y poder compararlo con la "oferta" que presenta el clima en su oscilación diaria.

## B.2. Selección y análisis de climas

Para las simulaciones se eligen seis localidades con severidad climática de verano creciente. Los climas son los siguientes: Cuenca, Madrid, Lleida, Granada, Cáceres y Sevilla. Según la zonificación climática de verano Cuenca corresponde con zona 2, Madrid, Lleida y Granada en zona 3 y Cáceres y Sevilla en zona 4. El clima de estas seis localidades se estudiará en mayor profundidad. En la figura B.7, se representan las capitales de provincia seleccionadas en función de la SCI y SCV.

En la figura B.8 se muestra gráficamente a través de la temperatura horaria el clima de las seis localidades. Las filas son los 365 días del año, columnas de izquierda a derecha de 0 h a 24 horas. En la figura se observa el verano como una mancha roja centrada de temperaturas más altas. Nótese la diferencia apreciable entre los climas.

Analizando en detalle las temperaturas se incluyen un conjunto de histogramas que muestran la diferencia clara que existe entre la temperatura diurna (9 a las 21 horas) y la nocturna (21 a 9 horas) para los distintos climas. Figura B.9. Estos histogramas marcan claramente el potencial de refrigeración natural del clima a través de la inercia térmica y consecuentemente a través de la integración de PCMs. Aún en las localidades más extremas en cuanto a temperaturas se nota claramente que las noches marcan en su mayor parte una temperatura muy inferior a la diurna, se observa también que



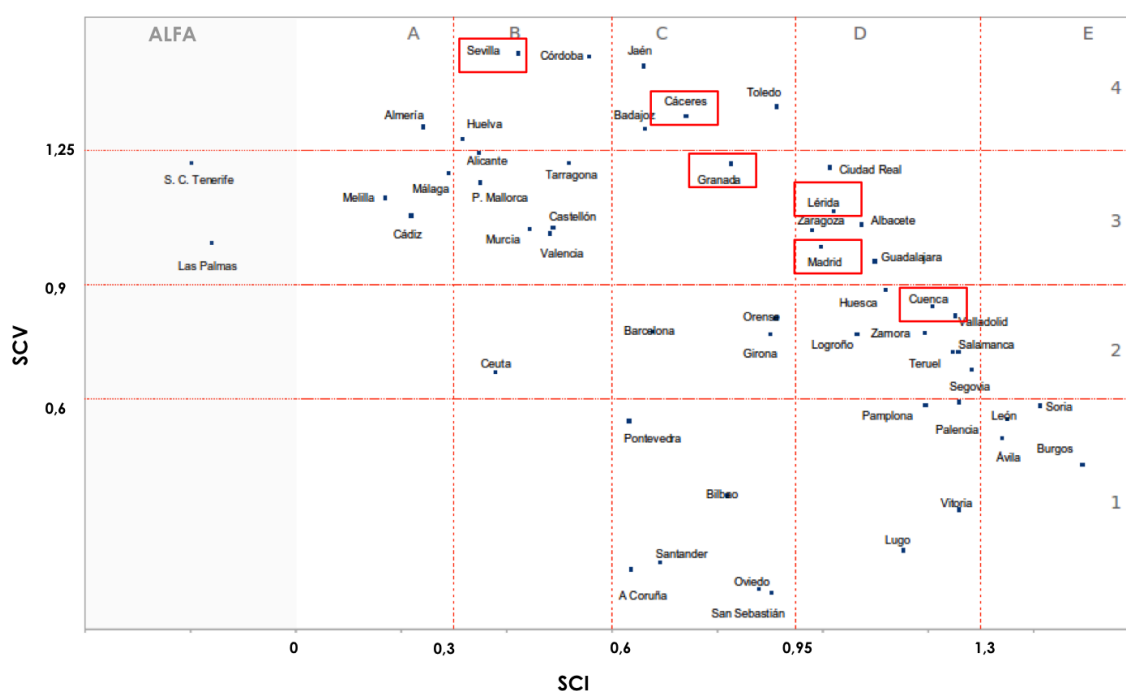


Figura B.7: Gráfico de zonas y severidades climáticas de capitales de provincia seleccionadas

un conjunto de horas consideradas nocturnas (del orden del 5 %) no será viable la carga por ser la temperatura superior a la del punto de fusión del PCM.

Si se restringe el estudio a los meses de Julio y Agosto que son aquellos que tienen las temperaturas máximas diurnas y nocturnas se observa que el mayor potencial de enfriamiento se concentra en la noche, lo que era previsible, en la franja horaria de las 21 horas a las 9 horas en general. En los gráficos B.10 y B.11 se muestra la variación horaria. Se ha marcado con línea de puntos los días de máxima y mínima temperatura, en azul la línea de tendencia de todas las series.

De los gráficos se puede deducir que es válido restringir la carga en general al periodo comprendido entre las 23 a 9 h y la descarga entre las 12 a 19 h.

Si restringimos el estudio para una temperatura de fusión en el entorno de los 22 °C, el Potencial para estas localidades es el siguiente. Tabla B.1.

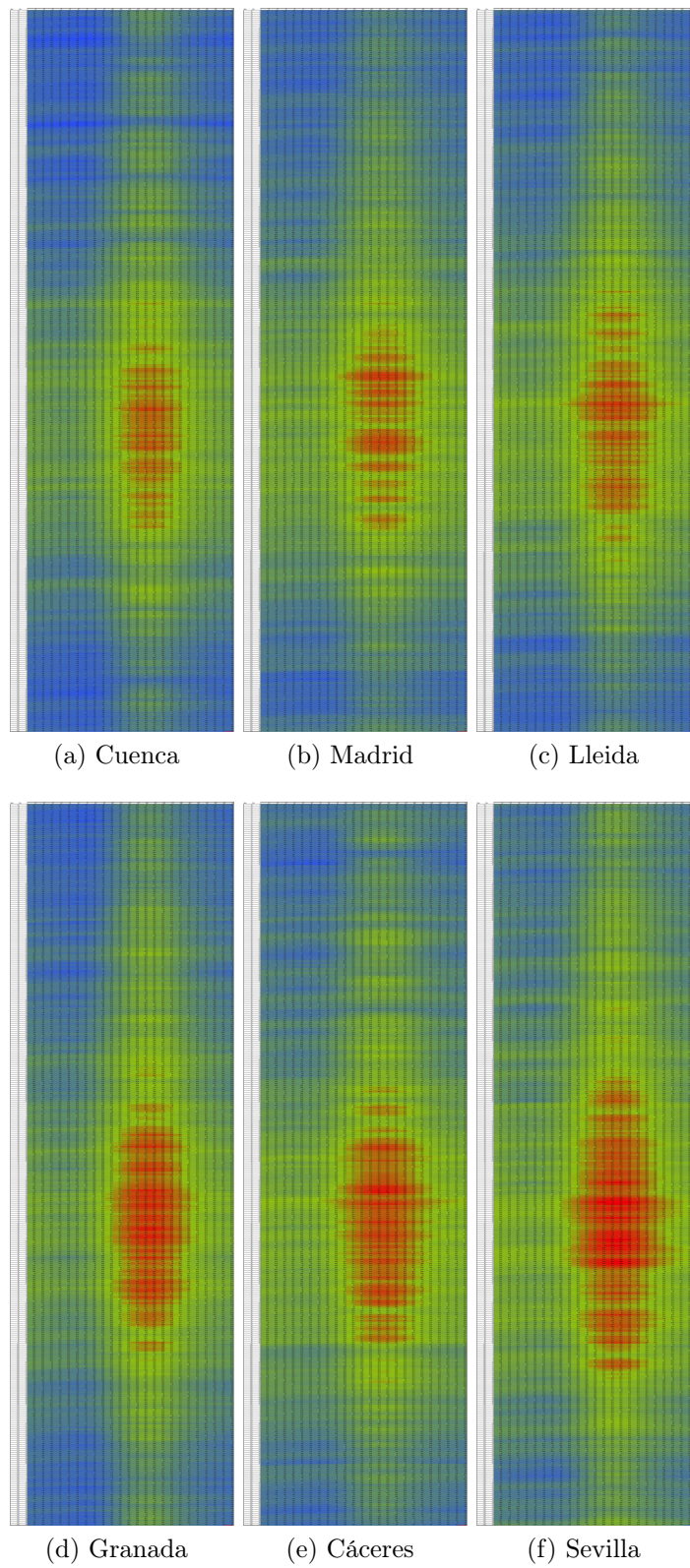


Figura B.8: Tabla-gráfico de climas de las seis localidades

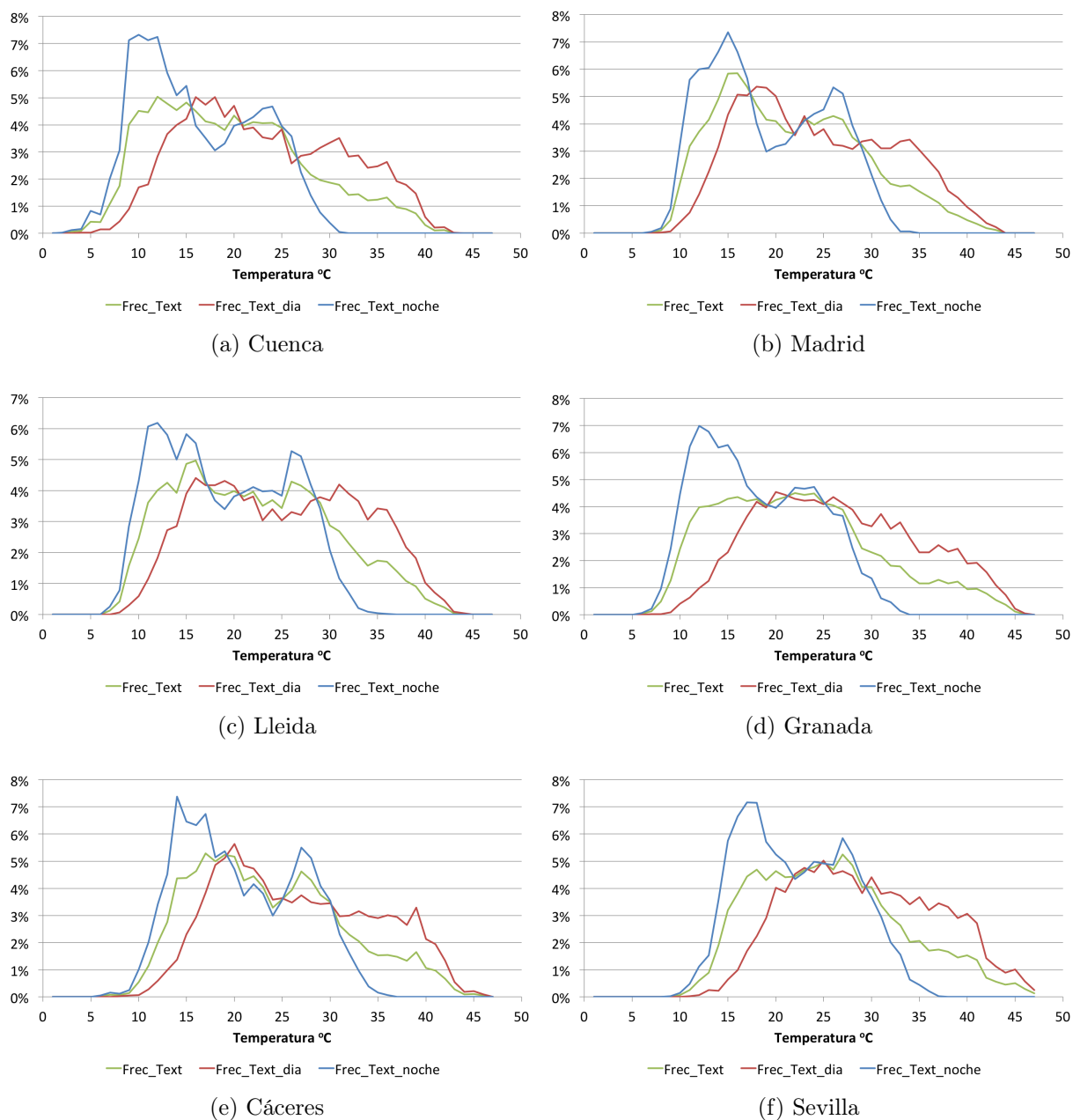
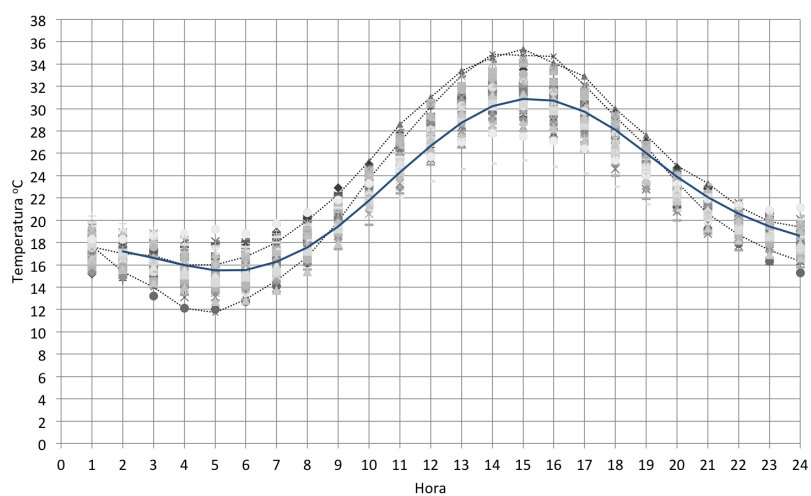
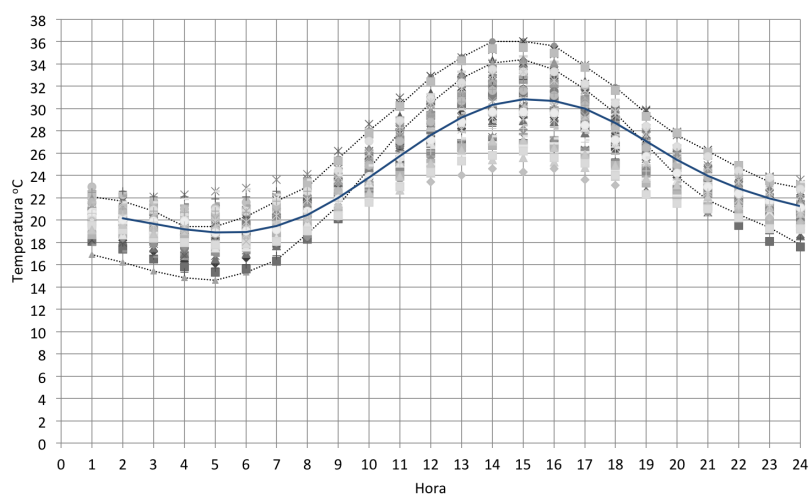


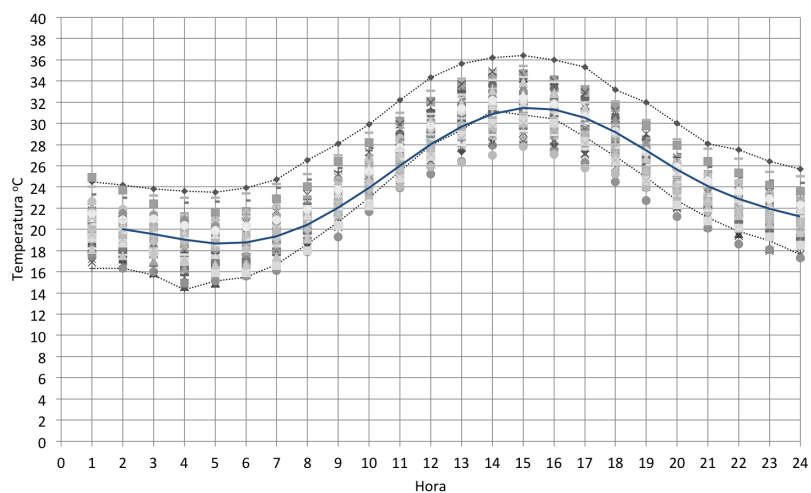
Figura B.9: Histogramas de temperaturas de las seis localidades



(a) Cuenca

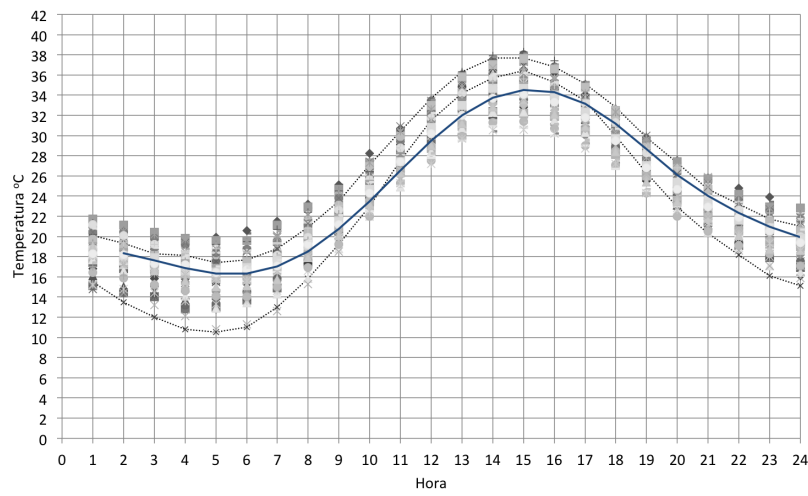


(b) Madrid

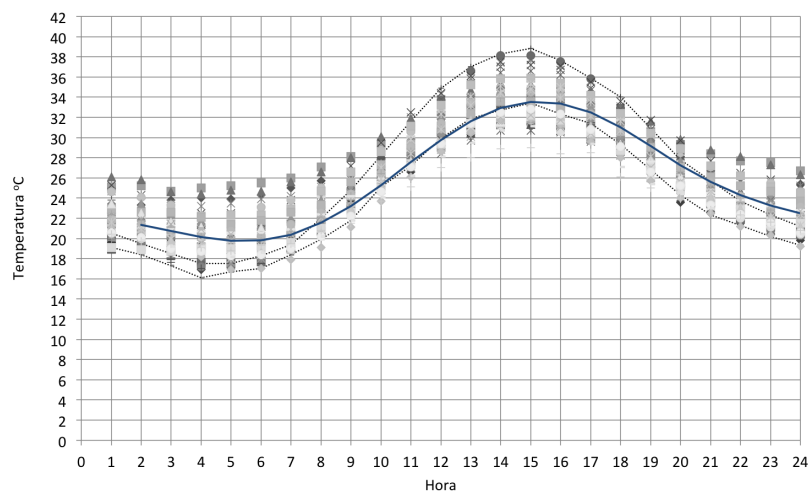


(c) Lleida

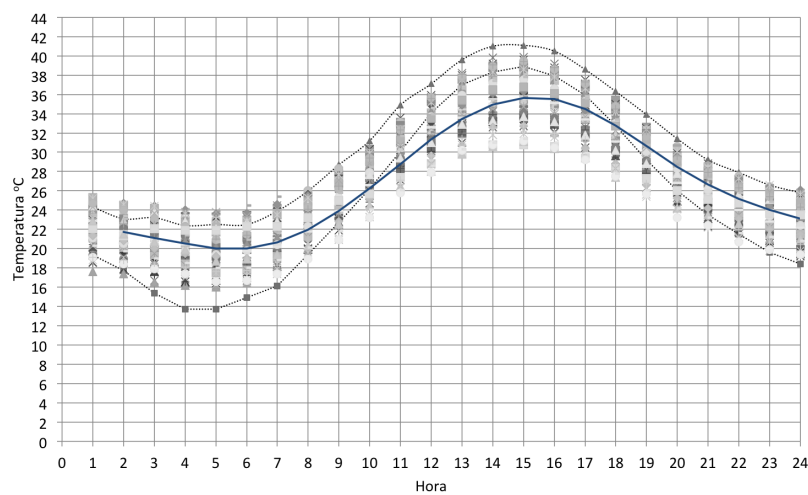
Figura B.10: Gráficos diarios de temperaturas horarias meses julio y agosto de Cuenca, Madrid y Lleida



(a) Granada



(b) Cáceres



(c) Sevilla

Figura B.11: Gráficos diarios de temperaturas horarias meses julio y agosto de Granada, Cáceres y Sevilla

Tabla B.1: Potencial climático para PCM de 22 °C

$Pot_{Carga} (GH)$	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Cuenca	3323,6	1695,4	1714,3	3255,1
Madrid	1959,8	646,0	708,9	1908,5
Lleida	1756,6	746,4	713,6	1854,0
Granada	2310,8	1307,4	1302,4	2280,8
Cáceres	1519,5	426,5	431,7	801,3
Sevilla	1120,2	444, 8	378,2	697,5

Los GH de refrigeración para estas localidades serán los indicados en la tabla B.2.

Tabla B.2: GH de refrigeración

GH de refrigeración	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Cuenca	84,2	827,3	707,3	222,7
Madrid	248,4	972,8	832,1	208,7
Lleida	349,8	1174,9	867,8	318,3
Granada	682,2	1651,5	1532,7	698,8
Cáceres	651,3	1711,9	1415,1	797,6
Sevilla	925,2	2201,4	2125,6	1080,7

Como se puede observar el Potencial de carga de Cuenca es muy alto frente a la necesidad de refrigeración. En el caso de Madrid y Lleida son similares aunque Lleida presenta un verano más caluroso. Granada cuenta con un potencial alto frente a la necesidad de refrigeración también alta. Cáceres y Sevilla en Julio y Agosto presentan un potencial mucho menor que los GH de estos meses.

Si se restringe la carga al período horario de entre las 23 a las 9 h y la descarga de 12 a 19 h, según se indicó, el  $PotR_{Carga}$  será el mostrado en las tablas B.3 y B.4. Los valores son significativamente menores.

Tabla B.3: Potencial climático restringido para PCM de 22 °C. Carga de 23 a 9 h.

$PotR_{Carga} (GH)$	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Cuenca	2581,8	1565,6	1542,9	2381,4
Madrid	1574,7	622,9	676,1	1470,6
Lleida	1536,8	711,5	695,0	1463,7
Granada	2013,3	1258,8	1238,5	1891,1
Cáceres	1314,6	424,7	429,0	759,9
Sevilla	1071,3	442,5	371,5	665,6

Tabla B.4: GH de refrigeración, descarga de 12 a 19 h

GH de refrigeración. R	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Cuenca	84,2	812,5	696,9	222,7
Madrid	245,4	884,0	770,8	208,7
Lleida	348,6	1030,8	827,4	312,1
Granada	665 ,0	1510,8	1423,5	678,8
Cáceres	597,5	1431,5	1260,3	761,5
Sevilla	876,0	1788,9	1751,1	1016,6

En los cálculos de GH se ha tomado como referencia la temperatura de 26°C; correspondientes a la temperatura de consigna límite del espacio interior del edificio en verano.

Por todo lo anterior se concluye que los climas seleccionados se pueden considerar válidos para el estudio.



# Bibliografía

- ABHAT, A.: «Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials». *Solar Energy*, 1983, **30(4)**, pp. 313–332. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(83)90186-X.
- ABOUL-ENEIN, S. y OLOFA, S.A.: «Thermophysical properties of heat-of-fusion storage materials for cooling applications». *Renewable Energy*, 1991, **1(5–6)**, pp. 791–797. ISSN 0960-1481. doi: 10.1016/0960-1481(91)90028-N.
- AGYENIM, FRANCIS; HEWITT, NEIL; EAMES, PHILIP y SMYTH, MERVYN: «A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14(2)**, pp. 615–628. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.015.
- AHMAD, MAHA; BONTEMPS, ANDRÉ; SALLÉE, HÉBERT y QUENARD, DANIEL: «Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material». *Energy and Buildings*, 2006a, **38(4)**, pp. 357–366. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.07.008.
- : «Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material». *Energy and Buildings*, 2006b, **38(6)**, pp. 673–681. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.11.002.
- ALAWADHI, ESAM M.: «Thermal analysis of a building brick containing phase change material». *Energy and Buildings*, 2008, **40(3)**, pp. 351–357. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001.
- ALAWADHI, ESAM M. y ALQALLAF, HASHEM J.: «Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study». *Energy Conversion and Management*, 2011, **52(8–9)**, pp. 2958–2964. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/j.enconman.2011.04.004.

- ALDERMAN, ROBERT J.: «Phase change thermal insulation structure», 1998. U.S. Classification: 428/68 International Classification: B32B 306.
- ALLONCLE, R: «Étude en régime périodique d'un accumulateur thermique à chaleur latente. Application à un matériau encapsulé.» *Revue Générale de thermique*, 1983, **254**, pp. 161–167.
- ALVAREZ, SERVANDO; CABEZA, LUISA F.; RUIZ-PARDO, ALVARO; CASTELL, ALBERT y TENORIO, JOSÉ ANTONIO: «Building integration of PCM for natural cooling of buildings». *Applied Energy*, 2013, **109**, pp. 514–522. ISSN 0306-2619. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.080.
- ARBANAS, VIVIANA; BUKOVEC, NATAŠA y BUKOVEC, PETER: «TG and DSC investigation of  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  PCM material». *Thermochimica Acta*, 1989, **144(2)**, pp. 235–240. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(89)85103-2.
- ARKAR, C.; VIDRIH, B. y MEDVED, S.: «Numerical modelling of free cooling of low energy building utilizing PCM heat storage integrated into the ventilation system». En: *8th International IEA Workshop (Annex 17), Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions. Kizkalesi, Mersin, Turkey.* < [www.fskab.com/Annex17](http://www.fskab.com/Annex17), , 2005.
- : «Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building». *International Journal of Refrigeration*, 2007, **30(1)**, pp. 134–143. ISSN 0140-7007. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2006.03.009.
- ASKEW, G. L.: «Solar heating utilization a paraffin's phase change material». En: *Proceedings of the second national passive solar conference, Philadelphia, PA*, , 1978.
- ATHIENITIS, A.K.; LIU, C.; HAWES, D.; BANU, D. y FELDMAN, D.: «Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage». *Building and Environment*, 1997, **32(5)**, pp. 405–410. ISSN 0360-1323. doi: 10.1016/S0360-1323(97)00009-7.
- BABICH, M.W.; HWANG, S.W. y MOUNTS, R.D.: «The search for novel energy storage materials using differential scanning calorimetry». *Thermochimica Acta*, 1992, **210(0)**, pp. 83–88. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(92)80279-6.
- BAETENS, RUBEN; JELLE, BJØRN PETTER y GUSTAVSEN, ARILD: «Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review».

- Energy and Buildings*, 2010, **42(9)**, pp. 1361–1368. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.
- BALOCCO, CARLA: «A simple model to study ventilated facades energy performance». *Energy and Buildings*, 2002, **34(5)**, pp. 469–475. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/S0378-7788(01)00130-X.
- BANU, D.; FELDMAN, D.; HAGHIGHAT, F.; PARIS, J. y HAWES, D.: «Energy-storing wallboard: flammability tests». *Journal of Materials in civil Engineering*, 1998, **10**, p. 98.
- BARKMANN, H. G. y WESSLING, F. C.: «Use of buildings structural components for thermal storage». En: *Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.
- BARRIO, M.; FONT, J.; LÓPEZ, D.O.; MUNTASELL, J. y TAMARIT, J.LL.: «Floor radiant system with heat storage by a solid-solid phase transition material». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, **27(2)**, pp. 127–133. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/0927-0248(92)90115-6.
- BASF: «Phase Change Materials - BASF Dispersions & Pigments». <http://www.micronal.de>, 2012.
- BEDECARRATS, J. P. y DUMAS, J. P.: «Etude de la cristallisation de nodules contenant un matériau à changement de phase en vue du stockage par chaleur latente». *International journal of heat and mass transfer*, 1997, **40(1)**, pp. 149–157. ISSN 0017-9310.
- BEHZADI, S. y FARID, M. M.: «Energy Storage for Efficient Energy Utilization in Buildings», 2010.
- BEST, JOHN S. y MCMILLAN, WILLIAM J.: «Heat or thermal energy storage structure», 1977. U.S. Classification: 165/53 International Classification: F24D 510; F28D 1300; C09K 500.
- BOURDEAU, L. E.: «Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage». En: *Presented at the 5th Natl. Passive Solar Conf., Amherst, Mass., 19-26 Oct. 1980*, volumen-1, pp. 19–26, 1980.
- BRAUN, J.E.; KLEIN, S.A. y MITCHELL, J.W.: «Seasonal storage of energy in solar heating». *Solar Energy*, 1981, **26(5)**, pp. 403–411. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(81)90219-X.

- BROWN, ROBERT C.; RASBERRY, JOHN D. y OVERMANN, SCOTT P.: «Microencapsulated phase-change materials as heat transfer media in gas-fluidized beds». *Powder Technology*, 1998, **98(3)**, pp. 217–222. ISSN 0032-5910. doi: 10.1016/S0032-5910(98)00080-1.
- BUDDHI, D y SHARMA, S.D: «Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: a latent heat storage material». *Energy Conversion and Management*, 1999, **40(18)**, pp. 1979–1984. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/S0196-8904(99)00077-1.
- BÉDÉCARRATS, J.P; STRUB, F; FALCON, B y DUMAS, J.P: «Phase-change thermal energy storage using spherical capsules: performance of a test plant». *International Journal of Refrigeration*, 1996, **19(3)**, pp. 187–196. ISSN 0140-7007. doi: 10.1016/0140-7007(95)00080-1.
- CABEZA, L. F.; ILLA, J.; ROCA, J.; BADIA, F.; MEHLING, H.; HIEBLER, S. y ZIEGLER, F.: «Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 32 to 36°C temperature range». *Materials and Corrosion*, 2001a, **52(2)**, p. 140–146. ISSN 1521-4176. doi: 10.1002/1521-4176(200102)52:2<140::AID-MACO140>3.0.CO;2-R.
- : «Middle term immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 32 to 36°C temperature range». *Materials and Corrosion*, 2001b, **52(10)**, p. 748–754. ISSN 1521-4176. doi: 10.1002/1521-4176(200110)52:10<748::AID-MACO748>3.0.CO;2-S.
- CABEZA, L. F.; ROCA, J.; NOGUEÉS, M.; MEHLING, H. y HIEBLER, S.: «Long term immersion corrosion tests on metal-PCM pairs used for latent heat storage in the 24 to 29°C temperature range». *Materials and Corrosion*, 2005, **56(1)**, p. 33–39. ISSN 1521-4176. doi: 10.1002/maco.200403806.
- CABEZA, L.F.; CASTELL, A.; BARRENECHE, C.; DE GRACIA, A. y FERNÁNDEZ, A.I.: «Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15(3)**, pp. 1675–1695. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- CABEZA, L.F.; ROCA, J.; NOGUÉS, M.; MEHLING, H. y HIEBLER, S.: «Immersion corrosion tests on metal-salt hydrate pairs used for latent heat storage in the 48 to 58°C temperature range». *Materials and Corrosion*, 2002, **53(12)**, p. 902–907. ISSN 1521-4176. doi: 10.1002/maco.200290004.

- CABEZA, LUISA F.; CASTELLÓN, CECILIA; NOGUÉS, MIQUEL; MEDRANO, MARC; LEPPERS, RON y ZUBILLAGA, OIHANA: «Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings». *Energy and Buildings*, 2007, **39(2)**, pp. 113–119. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.030.
- CABEZA, LUISA F.; SVENSSON, GUSTAV; HIEBLER, STEFAN y MEHLING, HARALD: «Thermal performance of sodium acetate trihydrate thickened with different materials as phase change energy storage material». *Applied Thermal Engineering*, 2003, **23(13)**, pp. 1697–1704. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/S1359-4311(03)00107-8.
- CANTOR, STANLEY: «Applications of differential scanning calorimetry to the study of thermal energy storage». *Thermochimica Acta*, 1978, **26(1–3)**, pp. 39–47. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(78)80055-0.
- CARBONARI, A.; DE GRASSI, M.; DI PERNA, C. y PRINCIPI, P.: «Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls». *Energy and Buildings*, 2006, **38(5)**, pp. 472–483. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.08.007.
- CASOL, ALBERT CASTELL: *Analysis and implementation of thermal energy storage using phase change materials for cooling applications*. Tesis doctoral, l'autor, 2009.
- CASTELL, A.; DOLADO, P; MCKEEVER, M.; GKOUSKOS, Z.; MUSTAPHA, K.; ROBINSON, T.; ZISKIND, G y FURMANSKI, P: «Next Generation cost effective phase change materials for increased energy efficiency in renewable energy systems in buildings», 2011. TU0802 (NeCoE-PCM) COST.
- CASTELLÓN, C.: *Use of microencapsulated phase change material in buildings*. Tesis doctoral, Ph. D. Thesis. GREÀ Innovació concurrent. University of Lleida, Spain, 2008.
- CASTELLÓN, C.; GÜNTHER, E.; MEHLING, H.; HIEBLER, S. y CABEZA, L. F.: «Determination of the enthalpy of PCM as a function of temperature using a heat-flux DSC—A study of different measurement procedures and their accuracy». *International Journal of Energy Research*, 2008, **32(13)**, p. 1258–1265. ISSN 1099-114X. doi: 10.1002/er.1443.
- CASTELLÓN, C.; MEDRANO, M.; ROCA, J.; NOGUES, M.; CASTELL, A. y CABEZA, L. F.: «Use of microencapsulated phase change materials in building applications». En: *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings, X International Conference*, , 2007.

- CASTELLÓN, CECILIA; MEDRANO, MARC; ROCA, JOAN; CABEZA, LUISA F.; NAVARRO, MARIA E.; FERNÁNDEZ, ANA I.; LÁZARO, ANA y ZALBA, BELEN: «Effect of microencapsulated phase change material in sandwich panels». *Renewable Energy*, 2010, **35**(10), pp. 2370–2374. ISSN 0960-1481. doi: 10.1016/j.renene.2010.03.030.
- CHAN, HOY-YEN; RIFFAT, SAFFA B. y ZHU, JIE: «Review of passive solar heating and cooling technologies». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, **14**(2), pp. 781–789. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2009.10.030.
- CHANDRA, S.; KUMAR, R.; KAUSHIK, S. y KAUL, S.: «Thermal performance of a non-air-conditioned building with PCCM thermal storage wall». *Energy Conversion and Management*, 1985, **25**(1), pp. 15–20. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/0196-8904(85)90064-0.
- CHEN, JOHNSON C. H. y EICHELBERGER, JOHN L.: «Encapsulated phase change thermal energy storage materials and process», 1985. U.S. Classification: 428/221 International Classification: B32D 326; B32D 518; F24D 510; F24D 1902.
- COLVIN, DAVID P.; BRYANT, YVONNE G.; DRISCOLL, JOHN C. y MULLIGAN, JAMES C.: «Thermal insulating coating employing microencapsulated phase change material ...», 1998. U.S. Classification: 428/327 International Classification: B32B 516.
- COSTELLO, V. A.; MELSHEIMER, S. S. y EDIE, D. D.: «Heat transfer and calorimetric studies of a direct contact-latent heat energy storage system». En: *Thermal Storage and Heat Transfer in Solar Energy Systems*, volumen-1, pp. 51–60, 1978.
- CRAWLEY, DRURY B.; LAWRIE, LINDA K.; WINKELMANN, FREDERICK C.; BUHL, W.F.; HUANG, Y.JOE; PEDERSEN, CURTIS O.; STRAND, RICHARD K.; LIESEN, RICHARD J.; FISHER, DANIEL E.; WITTE, MICHAEL J. y GLAZER, JASON: «EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program». *Energy and Buildings*, 2001, **33**(4), pp. 319–331. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/S0378-7788(00)00114-6.
- DE GRACIA, ALVARO; CASTELL, ALBERT; NAVARRO, LIDIA; ORÓ, EDUARD y CABEZA, LUISA F.: «Numerical-modelling of ventilated facades: A review». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **22**, p. 539–549.
- DE GRACIA, ALVARO; DAVID, DAMIEN; CASTELL, ALBERT; CABEZA, LUISA F. y VIRGONE, JOSEPH: «A correlation of the convective heat transfer

- coefficient between an air flow and a phase change material plate». *Applied Thermal Engineering*, 2013a, **51**(1–2), pp. 1245–1254. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.045.
- DE GRACIA, ALVARO; NAVARRO, LIDIA; CASTELL, ALBERT y CABEZA, LUISA F.: «Numerical study on the thermal performance of a ventilated facade with PCM». *Applied Thermal Engineering*, 2013b, **61**(2), pp. 372–380. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.07.035.
- DE GRACIA, ALVARO; NAVARRO, LIDIA; CASTELL, ALBERT; RUIZ-PARDO, ÁLVARO; ÁLVAREZ, SERVANDO y CABEZA, LUISA F.: «Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications». *Energy and Buildings*, 2013c, **65**, pp. 508–515. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.032.
- DE GRACIA CUESTA, ALVARO: «Thermal analysis of a ventilated facade with phase change materials (PCM)». <http://tdx.cesca.cat/handle/10803/117144>, 2013.
- DIARCE, GONZALO; URRESTI, AITOR; GARCÍA-ROMERO, ANA; DELGADO, ALEJANDRA; ERKOREKA, AITOR; ESCUDERO, CESAR y CAMPOS-CELADOR, ÁLVARO: «Ventilated active façades with PCM». *Applied Energy*, 2013, **109**, pp. 530–537. ISSN 0306-2619. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.032.
- DINÇER, İBRAHİM y ROSEN, MARC A.: *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. John Wiley and Sons, 2010. ISBN 9780470747063.
- DIZON, EDWIN S.: «Combined solar radiation collector and thermal energy storage device», 1978. U.S. Classification: 126/400 International Classification: F24H 700.
- DOMÍNGUEZ, MANUEL y GARCÍA, CARMEN: «Aprovechamiento de los Materiales de Cambio de Fase (PCM) en la Climatización». *Información tecnológica*, 2009, **20**(4), pp. 107–115. ISSN 0718-0764. doi: 10.4067/S0718-07642009000400012.
- DOMÍNGUEZ ALONSO, MANUEL; GARCÍA RODRÍGUEZ, CARMEN y ARIAS CARRILLO, J. M.: «Invernaderos con acumuladores de cambio de fase». <http://digital.csic.es/handle/10261/30653>, 2010. 20 páginas, 9 figuras, 5 tablas..

- DUNN, J.G.; SMITH, H.G. y WILLIX, R.L.: «The supercooling of acetamide». *Thermochimica Acta*, 1984, **80(2)**, pp. 343–353. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(84)87213-5.
- EAMES, IAN W. y ADREF, KAMEL T.: «Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems». *Applied Thermal Engineering*, 2002, **22(7)**, pp. 733–745. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/S1359-4311(02)00026-1.
- ECKERT, E. R. G.; GOLDSTEIN, R. J.; IBELE, W. E.; PATANKAR, S. V.; SIMON, T. W.; STRYKOWSKI, P. J.; TAMMA, K. K.; KUEHN, T. H.; BAR-COHEN, A.; HEBERLEIN, J. V. R.; HOFELDT, D. L.; DAVIDSON, J. H.; BISCHOF, J. y KULACKI, F.: «Heat transfer : a review of 1994 literature». *International journal of heat and mass transfer*, 1994, **40(16)**, pp. 3729–3804. ISSN 0017-9310.
- EDIE, D. D. y MELSHEIMER, S. S.: «An immiscible fluid - Heat of fusion energy storage system». En: *Sharing the Sun: Solar Technology in the Seventies, Volume 8*, volumen 8, pp. 262–272, 1976.
- ELDER, J.P.: «Thermal energy storage materials — a DSC study». *Thermochimica Acta*, 1980, **36(1)**, pp. 67–77. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(80)80110-9.
- EMMEL, MARCELO GUILLAUMON y MENDES, NATHAN: «Analysis of wind-driven flow and external convective heat transfer coefficients for the bestest model building», 2005.
- EUROPEAN COMMISSION: «DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Refundición». *Diario Oficial de la Unión Europea*, 2010.
- : «REGLAMENTO (UE) N o 305/2011 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 9 de marzo de 2011 por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo», 2011.
- FANG, XIAOMING y ZHANG, ZHENGGUO: «A novel montmorillonite-based composite phase change material and its applications in thermal storage building materials». *Energy and Buildings*, 2006, **38(4)**, pp. 377–380. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.07.005.



- FARID, MOHAMMED y YACCOUB, KASSIM: «Performance of direct contact latent heat storage unit». *Solar Energy*, 1989, **43(4)**, pp. 237–251. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(89)90023-6.
- FARID, MOHAMMED M. y KHALAF, ALI NASSER: «Performance of direct contact latent heat storage units with two hydrated salts». *Solar Energy*, 1994, **52(2)**, pp. 179–189. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(94)90067-1.
- FARID, MOHAMMED M; KHUDHAIR, AMAR M; RAZACK, SIDDIQUE ALI K y AL-HALLAJ, SAID: «A review on phase change energy storage: materials and applications». *Energy Conversion and Management*, 2004, **45(9–10)**, pp. 1597–1615. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.015.
- FAROUK, B. y GUCERI, S. I.: *Trombe-Michel wall using phase change materials*, 1981. ISBN CONF-791204-; Journal ID: CODEN: ALESD United StatesJournal ID: CODEN: ALESDWed Feb 06 22:21:15 EST 2008EDB-82-108550English.
- FELDMAN, D. y BANU, D.: «DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard». *Thermochimica Acta*, 1996, **272(0)**, pp. 243–251. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(95)02456-5.
- FELDMAN, D.; BANU, D.; HAWES, D. y GHANBARI, E.: «Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard». *Solar Energy Materials*, 1991, **22(2–3)**, pp. 231–242. ISSN 0165-1633. doi: 10.1016/0165-1633(91)90021-C.
- FELDMAN, D.; SHAPIRO, M.M. y BANU, D.: «Organic phase change materials for thermal energy storage». *Solar Energy Materials*, 1986, **13(1)**, pp. 1–10. ISSN 0165-1633. doi: 10.1016/0165-1633(86)90023-7.
- FERNÁNDEZ LLADÓ, JAVIER: «Análisis del comportamiento al fuego de materiales de construcción con adición de pcm», 2013.
- FLAHERTY, B.: «Characterisation of waxes by differential scanning calorimetry». *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, 1971, **21(5)**, p. 144–148. ISSN 1935-0554. doi: 10.1002/jctb.5020210507.
- FOUDA, A.E.; DESPAULT, G.J.G.; TAYLOR, J.B. y CAPES, C.E.: «Solar storage systems using salt hydrate latent heat and direct contact heat exchange—II Characteristics of pilot system operating with sodium sulphate

- solution». *Solar Energy*, 1984, **32**(1), pp. 57–65. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(84)90049-5.
- GHONEIM, A.A.; KLEIN, S.A. y DUFFIE, J.A.: «Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials». *Solar Energy*, 1991, **47**(3), pp. 237–242. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(91)90084-A.
- GIBBS, B. M. y HASNAIN, S. M.: «DSC study of technical grade phase change heat storage materials for solar heating applications». *Solar Engineering*, 1995, p. 1053–1053.
- GRIMISON, E. D.: «Correlation and utilization of new data on flow resistance and heat transfer for cross flow of gases over tube banks». *Trans. ASME*, 1937, **59**(7), p. 583–594.
- GROLL, M.; BROST, O. y HEINE, D.: «Corrosion of steels in contact with salt eutectics as latent heat storage materials: Influence of water and other impurities». *Heat Recovery Systems and CHP*, 1990, **10**(5–6), pp. 567–572. ISSN 0890-4332. doi: 10.1016/0890-4332(90)90207-Z.
- GSCHWANDER, S.; SCHOSSIG, P. y HENNING, H.-M.: «Micro-encapsulated paraffin in phase-change slurries». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, **89**(2–3), pp. 307–315. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/j.solmat.2004.12.008.
- H, KAKIUCHI: «Mitsubishi Chemical Corporation, Private Communication.», 2002.
- HADJIEVA, M.; KANEV, ST. y ARGIROV, J.: «Thermophysical properties of some paraffins applicable to thermal energy storage». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, **27**(2), pp. 181–187. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/0927-0248(92)90119-A.
- HADJIEVA, M; STOYKOV, R y FILIPOVA, TZ: «Composite salt-hydrate concrete system for building energy storage». *Renewable Energy*, 2000, **19**(1–2), pp. 111–115. ISSN 0960-1481. doi: 10.1016/S0960-1481(99)00024-5.
- HAGHIGHAT, F.; MOREAU, A.; INARD, C.; KÉVYN, J.; CASTELL, A. y ADEL-ZARRABI, B.: «State of the Art Review: Applying Energy Storage in Building of the Future. Subtask A&B Report Annex 23», 2013.
- HALFORD, C.K. y BOEHM, R.F.: «Modeling of phase change material peak load shifting». *Energy and Buildings*, 2007, **39**(3), pp. 298–305. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.07.005.

- HAUER, A.; MEHLING, H.; SCHOSSIG, P.; YAMAHA, M.; CABEZA, L. F.; MARTIN, V. y SETTERWALL, F.: «International Energy Agency Implementing Agreement on Energy Conservation through energy storage. Annex 17 Final Report (2005)», 2005.
- HAWES, D.W.; BANU, D. y FELDMAN, D.: «The stability of phase change materials in concrete». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, **27(2)**, pp. 103–118. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/0927-0248(92)90113-4.
- HAWES, D.W. y FELDMAN, D.: «Absorption of phase change materials in concrete». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, **27(2)**, pp. 91–101. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/0927-0248(92)90112-3.
- HAWES, D.W.; FELDMAN, D. y BANU, D.: «Latent heat storage in building materials». *Energy and Buildings*, 1993, **20(1)**, pp. 77–86. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/0378-7788(93)90040-2.
- HAWLADER, M.N.A.; UDDIN, M.S. y KHIN, MYA MYA: «Microencapsulated PCM thermal-energy storage system». *Applied Energy*, 2003, **74(1–2)**, pp. 195–202. ISSN 0306-2619. doi: 10.1016/S0306-2619(02)00146-0.
- HEATING, I. E. A. S.; TASK, C. y HADORN, J. C.: *Thermal Energy Storage for Solar and Low Energy Buildings: State of the Art*. Servei de Publicacions Universitat Lleida, 2005.
- HEINE, D.: «Corrosion behaviour of steels in contact with salt eutectics as latent heat storage materials». *Heat recovery systems and CHP*, 1987, **7(4)**, pp. 389–394. ISSN 0890-4332.
- HEWITT, GEOFFREY FREDERICK; SHIRES, GEORGE L. y BOTT, THEODORE REGINALD: *Process heat transfer*. volumen 113. CRC press London, 1994.
- HONG, HIKI; KIM, SUN KUK y KIM, YONG-SHIK: «Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials». *International Journal of Refrigeration*, 2004, **27(4)**, pp. 360–366. ISSN 0140-7007. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2003.12.006.
- HONG, YE y XIN-SHI, GE: «Preparation of polyethylene-paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, **64(1)**, pp. 37–44. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/S0927-0248(00)00041-6.

- HOULE, JEAN-FRANCOIS y PARIS, JEAN: «Process for incorporation of a phase change material into gypsum wallboards ...», 1991. U.S. Classification: 427/372.2 International Classification: B05D 102; B05D 302.
- HU, HENRY y ARGYROPOULOS, STAVROS A.: «Mathematical modelling of solidification and melting: a review». *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 1996, **4(4)**, p. 371.
- IBRAHIM, DINCER: «On thermal energy storage systems and applications in buildings». *Energy and Buildings*, 2002, **34(4)**, pp. 377–388. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/S0378-7788(01)00126-8.
- IBÁÑEZ, MANUEL; LÁZARO, ANA; ZALBA, BELÉN y CABEZA, LUISA F.: «An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS». *Applied Thermal Engineering*, 2005, **25(11–12)**, pp. 1796–1807. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2004.11.001.
- IDAE: «Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020». *Informe técnico*, Instituto para la Diversificación y el Ahorro de Energía, 2011a.
- : «Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España.», 2011b.
- INABA, H. y TU, P.: «Evaluation of thermophysical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material». *Heat and Mass Transfer*, 1997, **32(4)**, pp. 307–312. ISSN 0947-7411. doi: 10.1007/s002310050126.
- IRULEGI, OLATZ; SERRA, A.; HERNÁNDEZ, R.; RUIZ-PARDO, A. y TORRES, L.: «Fachadas ventiladas activas para reducir la demanda de calefacción en los edificios de oficinas. El caso de España». *Informes de la Construcción*, 2012, **64(528)**, p. 575–585.
- ISMAIL, K. A. R. y HENRÍQUEZ, J. R.: «Performance of composite glass windows». En: *Proceedings of the EUROTHERM SEMINAR No.*, volumen 44, p. 219–30, 1995.
- ISMAIL, KAMAL A.R.; SALINAS, CARLOS T. y HENRÍQUEZ, JORGE R.: «Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows». *Energy and Buildings*, 2008, **40(5)**, pp. 710–719. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.05.005.

- ISMAIL, K.A.R. y HENRÍQUEZ, J.R.: «Thermally effective windows with moving phase change material curtains». *Applied Thermal Engineering*, 2001, **21**(18), pp. 1909–1923. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/S1359-4311(01)00058-8.
- ISMAIL, K.A.R y HENRÍQUEZ, J.R.: «Parametric study on composite and PCM glass systems». *Energy Conversion and Management*, 2002, **43**(7), pp. 973–993. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/S0196-8904(01)00083-8.
- JAHNS, E.: «Microencapsulated phase change material». *Proceedings of the 4th IEA ECES IEA Annex*, 1999, **10**.
- JEON, JISOO; LEE, JUNG-HUN; SEO, JUNGKI; JEONG, SU-GWANG y KIM, SUMIN: «Application of PCM thermal energy storage system to reduce building energy consumption». *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, **111**(1), pp. 279–288. ISSN 1388-6150, 1572-8943. doi: 10.1007/s10973-012-2291-9.
- JOHNSON, TIMOTHY E. y GIUFFRIDA, JOHN: «Aqueous heat-storage compositions containing fumed silicon dioxide and ...», 1980. U.S. Classification: 252/70 International Classification: C09K 506.
- KAASINEN, H.: «The absorption of phase change substances into commonly used building materials». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, **27**(2), pp. 173–179. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/0927-0248(92)90118-9.
- KEDL, R. J. y STOVALL, T. K.: *Activities in support of the wax-impregnated wallboard concept*, 1989. ISBN CONF-890351-7; Other: ON: DE89008566 United StatesOther: ON: DE89008566Thu Feb 07 17:40:01 EST 2008NTIS, PC A03/MF A01 - OSTI; 1.EDB-89-054577English.
- KENISARIN, MURAT y MAHKAMOV, KHAMID: «Solar energy storage using phase change materials». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, **11**(9), p. 1965.
- KHUDHAIR, AMAR M. y FARID, MOHAMMED M.: «A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials». *Energy Conversion and Management*, 2004, **45**(2), pp. 263–275. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/S0196-8904(03)00131-6.
- KONDO, T. y IBAMOTO, T.: «Research on using the PCM for ceiling board». En: *Proceedings of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage – Futurestock'2003, Warsaw (Poland)*, volumen 17, 2003.

- KOSCHENZ, MARKUS y LEHMANN, BEAT: «Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings». *Energy and Buildings*, 2004, **36(6)**, pp. 567–578. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.01.029.
- KOŠNY, J.; YARBROUGH, D.; MILLER, W.; SHRESTHA, S.; KOSSECKA, E. y LEE, EDWIN: «Numerical and Experimental Analysis of Building Envelopes Containing Blown Fiberglass Insulation Thermally Enhanced with Phase Change Material (PCM)». En: *Proceedings of the 1st Central European Symposium on Building Physics*, p. 13–15, 2010.
- KOŠNY, JAN; BISWAS, KAUSHIK; MILLER, WILLIAM y KRINER, SCOTT: «Field thermal performance of naturally ventilated solar roof with PCM heat sink». *Solar Energy*, 2012, **86(9)**, pp. 2504–2514. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/j.solener.2012.05.020.
- KUZNİK, FRÉDÉRIC; DAVID, DAMIEN; JOHANNES, KEVYN y ROUX, JEAN-JACQUES: «A review on phase change materials integrated in building walls». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15(1)**, pp. 379–391. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2010.08.019.
- KUZNİK, FRÉDÉRIC; VIRGONE, JOSEPH y JOHANNES, KEVYN: «Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM». *Energy and Buildings*, 2010, **42(7)**, pp. 1004–1009. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.012.
- KUZNİK, FRÉDÉRIC; VIRGONE, JOSEPH y ROUX, JEAN-JACQUES: «Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation». *Energy and Buildings*, 2008, **40(2)**, pp. 148–156. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.01.022.
- LAMBERG, P.; JOKISALO, J. y SIRÉN, K.: «The effects on indoor comfort when using phase change materials with building concrete products». *Helsinki University of Technology, Finland (Rapport interne)*, 2000.
- LAMBERG, PIIA y SIRÉN, KAI: «Approximate analytical model for solidification in a finite PCM storage with internal fins». *Applied Mathematical Modelling*, 2003, **27(7)**, pp. 491–513. ISSN 0307-904X. doi: 10.1016/S0307-904X(03)00080-5.
- LANE, G.A.: *Solar heat storage: Latent heat materials*. volumen Volume I: Background and Scientific Principles, 1983.

- : «Hand book of thermal design». *Phase Change Thermal Storage Materials*, McGraw Hill Book Co, 1989.
- LANE, GEORGE A.: «Low temperature heat storage with phase change materials». *International Journal of Ambient Energy*, 1980, **1(3)**, pp. 155–168. ISSN 0143-0750. doi: 10.1080/01430750.1980.9675731.
- LEE, T.; HAWES, D.W.; BANU, D. y FELDMAN, D.: «Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, **62(3)**, pp. 217–237. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/S0927-0248(99)00128-2.
- LI, JING-HUA; ZHANG, GUI-EN y WANG, JIN-YUN: «Investigation of a eutectic mixture of sodium acetate trihydrate and urea as latent heat storage». *Solar Energy*, 1991, **47(6)**, pp. 443–445. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/0038-092X(91)90112-A.
- LI, WEIPING; ZHANG, DAOSHENG; ZHANG, TAIPING; WANG, TIANZHI; RUAN, DESHUI; XING, DENGQING y LI, HOUBIN: «Study of solid–solid phase change of  $(n\text{-C}_n\text{H}_{2n+1}\text{NH}_3)_2\text{MCl}_4$  for thermal energy storage». *Thermochimica Acta*, 1999, **326(1–2)**, pp. 183–186. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/S0040-6031(98)00497-3.
- LIN, KUNPING; ZHANG, YINPING; XU, XU; DI, HONGFA; YANG, RUI y QIN, PENGHUA: «Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates». *Building and Environment*, 2004, **39(12)**, pp. 1427–1434. ISSN 0360-1323. doi: 10.1016/j.buildenv.2004.04.005.
- : «Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates». *Energy and Buildings*, 2005, **37(3)**, pp. 215–220. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.06.017.
- LIU, ZONGRONG y CHUNG, D.D.L.: «Calorimetric evaluation of phase change materials for use as thermal interface materials». *Thermochimica Acta*, 2001, **366(2)**, pp. 135–147. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/S0040-6031(00)00716-4.
- LÁZARO, A.; ZALBA, B.; BOBI, M.; CASTELLÓN, C. y CABEZA, L. F.: «Experimental study on phase change materials and plastics compatibility». *AIChE Journal*, 2006a, **52(2)**, p. 804–808. ISSN 1547-5905. doi: 10.1002/aic.10643.

- LÁZARO, ANA; GÜNTHER, EVA; MEHLING, HARALD; HIEBLER, STEFAN; MARÍN, JOSÉ M y ZALBA, BELÉN: «Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials». *Measurement Science and Technology*, 2006b, **17(8)**, pp. 2168–2174. ISSN 0957-0233, 1361-6501. doi: 10.1088/0957-0233/17/8/016.
- MARCUS, YIZHAK; MINEVICH, ALEXANDER y BEN-DOR, LINA: «Differential drop calorimetry for the determination of enthalpy of fusion». *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 2003, **35(6)**, pp. 1009–1018. ISSN 0021-9614. doi: 10.1016/S0021-9614(03)00045-4.
- MARÍN, JOSÉ M.; ZALBA, BELÉN; CABEZA, LUISA F. y MEHLING, HARALD: «Determination of enthalpy–temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties». *Measurement Science and Technology*, 2003, **14(2)**, p. 184. ISSN 0957-0233. doi: 10.1088/0957-0233/14/2/305.
- MAZO, JAVIER; DELGADO, MONICA; MARIN, JOSE MARIA y ZALBA, BELÉN: «Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump». *Energy and Buildings*, 2012, **47**, pp. 458–466. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.022.
- MEHLING, H.; KRIPPNER, R. y HAUER, A.: «Research project on PCM in wood-lightweight-concrete». En: *Proceedings of the 2nd Workshop of IEA ECES IA Annex*, volumen 17, 2002.
- MEHLING, HARALD y CABEZA, LUISA F.: «Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications. Applications for heating and cooling in buildings». En: *Heat and cold storage with PCM*, pp. 217–295. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-68556-2, 978-3-540-68557-9.
- MERKER, O.; HEPP, V.; BECK, A. y FRICKE, J.: «A new PCM-shading system: a study of the thermal charging and discharging process». En: *Proceedings of Eurosun*, , 2002.
- MINISTERIO-DE-FOMENTO: «Código Técnico de la Edificación», 2006.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO: «Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios. Versión consolidada septiembre 2013», 2007.



- NAGANO, K.; OGAWA, K.; MOCHIDA, T.; HAYASHI, K. y OGOSHI, H.: «Performance of heat charge/discharge of magnesium nitrate hexahydrate and magnesium chloride hexahydrate mixture to a single vertical tube for a latent heat storage system». *Applied Thermal Engineering*, 2004, **24**(2–3), pp. 209–220. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.09.002.
- NAGANO, K.; TAKEDA, S.; MOCHIDA, T.; SHIMAKURA, K. y NAKAMURA, T.: «Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—Heat response in small scale experiments». *Energy and Buildings*, 2006, **38**(5), pp. 436–446. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.07.010.
- NAUMANN, R. y EMONS, H. H.: «Results of thermal analysis for investigation of salt hydrates as latent heat-storage materials». *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1989, **35**(3), p. 1009–1031.
- NEEPER, D.: «Benefits of wallboard impregnated with phase change material for residential heating and cooling». *Subcontract Report to Solar Energy Research Institute*, 1990.
- NEEPER, D.A.: «Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage». *Solar Energy*, 2000, **68**(5), pp. 393–403. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/S0038-092X(00)00012-8.
- NEUMANN, F.: «Die Paruellen Differentialgleichungen der Mathematischen», 1912.
- OLIVER, A.; NEILA, F. J. y GARCÍA, A.: «Caracterización térmica de placas de yeso con material de cambio de fase incorporado». *Informes de la Construcción*, 2010, **62**(519), pp. 55–66. ISSN 1988-3234, 0020-0883. doi: 10.3989/ic.09.036.
- PARIS, JEAN; FALARDEAU, MICHEL y VILLENEUVE, CÉCILE: «Thermal Storage by Latent Heat: A Viable Option for Energy Conservation in Buildings». *Energy Sources*, 1993, **15**(1), pp. 85–93. ISSN 0090-8312. doi: 10.1080/00908319308909014.
- PASUPATHY, A.; ATHANASIOS, L.; VELRAJ, R. y SEENIRAJ, R.V.: «Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management». *Applied Thermal Engineering*, 2008a, **28**(5–6), pp. 556–565. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.016.

- PASUPATHY, A. y VELRAJ, R.: «Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management». *Energy and Buildings*, 2008, **40**(3), pp. 193–203. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.016.
- PASUPATHY, A.; VELRAJ, R. y SEENIRAJ, R.V.: «Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008b, **12**(1), pp. 39–64. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2006.05.010.
- PEDERSEN, C. O.: «Advanced zone simulation in Energyplus: Incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability». En: *10th International IBPSA Conference, Beijing, China*, , 2007.
- PEIPPO, K.; KAURANEN, P. y LUND, P.D.: «A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating». *Energy and Buildings*, 1991, **17**(4), pp. 259–270. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/0378-7788(91)90009-R.
- PINEL, PATRICE; CRUICKSHANK, CYNTHIA A.; BEAUSOLEIL-MORRISON, IAN y WILLS, ADAM: «A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**(7), pp. 3341–3359. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2011.04.013.
- PINO, GONZÁLEZ y LIZARRAGA, JOSÉ MARÍA SALA: «los materiales de cambio de fase en la rehabilitación de vivienda social», 2013.
- PLUTA, Z.: «Numerical analysis of pebble/PCM bed storage systems for solar air heating installations». En: *Proceedings of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage–Futurestock*, , 2003.
- PUSHAW, ROBERT J.: «Skived foam article containing energy absorbing phase change material», 1998. U.S. Classification: 156/278 International Classification: B05D 302.
- PY, XAVIER; OLIVES, RÉGIS y MAURAN, SYLVAIN: «Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**(14), pp. 2727–2737. ISSN 0017-9310. doi: 10.1016/S0017-9310(00)00309-4.
- REACH. EUROPEAN COMMISSION: «Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency,

- amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC». <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006R1907:EN:NOT>, 2006.
- RICHARDSON, M.J.: «The derivation of thermodynamic properties by DSC: free energy curves and phase stability». *Thermochimica Acta*, 1993, **229(0)**, pp. 1–14. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(93)80310-7.
- RUIZ-PARDO, A.: *Ahorro energético mediante el uso de elementos de doble envoltante transparente-opaco*. Tesis doctoral, PhD Thesis, University of Seville, Sevilla, 2008.
- RUIZ-PARDO, A.; SÁNCHEZ, F.J.; SÁNCHEZ RAMOS, J.; DE GRACIA, A. y CABEZA, L. F.: «Numerical simulation of a ventilated facade with PCM inside the air channel». En: *Innostock 2012*, Lleida, 2012.
- RYU, HEE W; WOO, SUNG W; SHIN, BYUNG C y KIM, SANG D: «Prevention of supercooling and stabilization of inorganic salt hydrates as latent heat storage materials». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, **27(2)**, pp. 161–172. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/0927-0248(92)90117-8.
- SALMERÓN, J.M: *Caracterización de las técnicas de refrigeración natural con acumulación estructural: potencial de ahorro energético en el acondicionamiento de edificios*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, 2005.
- SALYER, I. O.; BOTHAM, R. A.; JENKINS, G. H. y BALL, G. L.: «Form-stable, crystalline polymer pellets for thermal energy storage». En: *13th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, volumen-1, pp. 948–962, 1978.
- SALYER, I. O. y SIRCAR, A. K.: «Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications.» En: *Proceedings of the intersociety energy conversion engineering conference*, volumen 25, p. 236–243, 1990.
- SALYER, I. O.; SIRCAR, A. K.; CHARTOFF, R. P. y MILLER, D. E.: «Advanced phase-change materials for passive solar storage applications». En: *Proceedings of the Solar Building Conference, Silver Spring (Washington DC, USA)*, , 1985.

- SALYER, I. O.; SIRCAR, A. K. y KUMAR, A.: «Advanced phase change materials technology: evaluation in lightweight solite hollow-core building blocks», 1995.
- SALYER, IVAL O.: «Phase change compositions», 1989. U.S. Classification: 106/660 International Classification: C04B 2408.
- : «Polyolefin composites containing a phase change material», 1991. U.S. Classification: 524/8 International Classification: C09K 318; C08K 300; C08K 501.
- : «Thermoplastic, moldable, non-exuding phase change materials», 1996. U.S. Classification: 252/70 International Classification: C09K 318; F28D 1700.
- : «Building products incorporating phase change materials and method of making ...», 1998. U.S. Classification: 126/618 International Classification: F24J 236.
- SAMAN, W.; BRUNO, F. y HALAWA, E.: «Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system». *Solar Energy*, 2005, **78(2)**, pp. 341–349. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/j.solener.2004.08.017.
- SANJUÁN, M. A.: «La normalización en Europa orientada a garantizar edificios y construcciones saludables», 2012.
- SARI, A y KAYGUSUZ, K: «Some fatty acids used for latent heat storage: thermal stability and corrosion of metals with respect to thermal cycling». *Renewable Energy*, 2003, **28(6)**, pp. 939–948. ISSN 0960-1481. doi: 10.1016/S0960-1481(02)00110-6.
- SCALAT, S.; BANU, D.; HAWES, D.; PARISH, J.; HAGHIGHATA, F. y FELDMAN, D.: «Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1996, **44(1)**, pp. 49–61. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/0927-0248(96)00017-7.
- SCHOSSIG, P.; HENNING, H.-M.; GSCHWANDER, S. y HAUSSMANN, T.: «Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2005, **89(2–3)**, pp. 297–306. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/j.solmat.2005.01.017.
- SCHOSSIG, P.; HENNING, H.-M.; HAUSSMANN, T. y RAICU, A.: «Encapsulated phase-change materials integrated into constructions materials». *Informe técnico*, 2003.

- SHARMA, ATUL; SHARMA, S.D y BUDDHI, D: «Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications». *Energy Conversion and Management*, 2002, **43(14)**, pp. 1923–1930. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/S0196-8904(01)00131-5.
- SHARMA, ATUL; TYAGI, V.V.; CHEN, C.R. y BUDDHI, D.: «Review on thermal energy storage with phase change materials and applications». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13(2)**, pp. 318–345. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- SHARMA, S.D.; BUDDHI, D. y SAWHNEY, R.L.: «Accelerated thermal cycle test of latent heat-storage materials». *Solar Energy*, 1999, **66(6)**, pp. 483–490. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/S0038-092X(99)00045-6.
- SHARMA, S.D. y SAGARA, KAZUNOBU: «Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review». *International Journal of Green Energy*, 2005, **2(1)**, pp. 1–56. ISSN 1543-5075. doi: 10.1081/GE-200051299.
- SHILEI, LV; NENG, ZHU y GUOHUI, FENG: «Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage». *Energy and Buildings*, 2006a, **38(6)**, pp. 708–711. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.10.006.
- : «Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter». *Energy and Buildings*, 2006b, **38(1)**, pp. 18–24. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.02.007.
- SOARES, N.; COSTA, J.J.; GASPAR, A.R. y SANTOS, P.: «Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency». *Energy and Buildings*, 2013, **59**, pp. 82–103. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.12.042.
- SPEYER, R. F.: *Thermal analysis of materials*. volumen 5. CRC, 1994.
- STETIU, C. y FEUSTEL, H. E.: «Phase change wallboard as an alternative to compressor cooling in Californian residences». En: *Proceedings of 96 ACEE Summer Study for Energy Efficient Building, California, USA*, volumen 96, 1996.
- STOVALL, T. K. y TOMLINSON, J. J. [OAK RIDGE NATIONAL LAB: *What are the potential benefits of including latent storage in common wallboard?*, 1995.

- STRITIH, UROS y BUTALA, VINCENC: «Energy saving in building with PCM cold storage». *International Journal of Energy Research*, 2007, **31(15)**, p. 1532–1544. ISSN 1099-114X. doi: 10.1002/er.1318.
- SWET, C. J.: *Phase change storage in passive solar architecture*, 1980. ISBN CONF-801016-(Vol.1); Journal ID: CODEN: PMSID United StatesJournal ID: CODEN: PMSIDFri Feb 08 00:38:52 EST 2008TIC; EDB-81-061796English.
- TABARES-VELASCO, PAULO CESAR; CHRISTENSEN, CRAIG y BIANCHI, MARCUS: «Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies». *Building and Environment*, 2012, **54**, pp. 186–196. ISSN 0360-1323. doi: 10.1016/j.buildenv.2012.02.019.
- TAKAHASHI, Y.; NEGISHI, A.; ABE, Y.; TANAKA, K. y KAMIMOTO, M.: «Thermoanalytical investigation of fluoride composites for latent thermal storage». *Thermochimica Acta*, 1991, **183(0)**, pp. 299–311. ISSN 0040-6031. doi: 10.1016/0040-6031(91)80466-V.
- TAKEDA, S.; NAGANO, K.; MOCHIDA, T. y NAKAMURA, T.: «Development of floor supply air conditioning system with granulated phase change materials». En: *Proceedings of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage–Futurestock*, , 2003.
- TAKEDA, S.; NAGANO, K.; MOCHIDA, T. y SHIMAKURA, K.: «Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material». *Solar Energy*, 2004, **77(3)**, pp. 329–338. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/j.solener.2004.04.014.
- TELKES, M.: «Thermal storage for solar heating and cooling». *Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings*, 1975, **Charlottesville, VA, USA..**
- TETLOW, DAVID; SU, YUEHONG y RIFFAT, SAFFA B.: «EnergyPlus simulation analysis of incorporating microencapsulated PCMs (Phase Change Materials) with internal wall insulation (IWI) for hard-to-treat (HTT) houses in the UK». En: *10th International Conference on Sustainable Energy Technologies, Istanbul, Turkey*, , 2011.
- TURNPENNY, J.R.; ETHERIDGE, D.W. y REAY, D.A.: «Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings.: Part I: testing and theoretical modelling». *Applied Thermal Engineering*, 2000, **20(11)**, pp. 1019–1037. ISSN 1359-4311. doi: 10.1016/S1359-4311(99)00068-X.

- TYAGI, VINEET VEER y BUDDHI, D.: «PCM thermal storage in buildings: A state of art». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, **11(6)**, pp. 1146–1166. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002.
- WADA, T.; YOKOTANI, F. y MATSUO, Y.: «Equilibria in the aqueous ternary system containing  $\text{Na}^+$ ,  $\text{CH}_3\text{CO}_2$ , and  $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$  between 38 and 85°C». *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1984, **57(6)**, pp. 1671–1672. ISSN 0009-2673.
- WANG, XIN; ZHANG, YINPING; XIAO, WEI; ZENG, RUOLANG; ZHANG, QUNLI y DI, HONGFA: «Review on thermal performance of phase change energy storage building envelope». *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54(6)**, pp. 920–928. ISSN 1001-6538. doi: 10.1007/s11434-009-0120-8.
- WWW.CLIMATOR.COM: «Climator - Home». <http://www.climator.com/en/home/>, 2013.
- WWW.COSELLA DORKEN.COM: «DELTA ® PCM - Smart Temperature Management with Phase Change Materials». <http://www.cosella-dorken.com/bvf-ca-en/products/pcm/index.php>, 2013.
- WWW.CRISTOPIA.COM: «Cristopia Energy Systems». <http://www.cristopia.com/>, 2013.
- WWW.EPSLTD.CO.UK: «Environmental Process Systems Ltd». <http://www.epsltd.co.uk/>, 2013.
- WWW.MICRONAL.DE: «Phase Change Materials - BASF Dispersions - Pigments». <http://www.micronal.de>, 2013.
- WWW.RUBITHERM.DE: «RUBITHERM GmbH». <http://www.rubitherm.de/>, 2013.
- WWW.TEAPPCM.COM: «PCM Phase Change Material Manufacturers Electronics, Air Condition». <http://www.teappcm.com/>, 2013.
- XIAO, MIN; FENG, BO y GONG, KECHENG: «Thermal performance of a high conductive shape-stabilized thermal storage material». *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, **69(3)**, pp. 293–296. ISSN 0927-0248. doi: 10.1016/S0927-0248(01)00056-3.
- : «Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity». *Energy Conversion and Management*, 2002, **43(1)**, pp. 103–108. ISSN 0196-8904. doi: 10.1016/S0196-8904(01)00010-3.

- XU, LEI y OJIMA, TOSHIO: «Field experiments on natural energy utilization in a residential house with a double skin façade system». *Building and Environment*, 2007, **42(5)**, pp. 2014–2023. ISSN 0360-1323. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.026.
- XU, XU; ZHANG, YINPING; LIN, KUNPING; DI, HONGFA y YANG, RUI: «Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings». *Energy and Buildings*, 2005, **37(10)**, pp. 1084–1091. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.12.016.
- YINPING, ZHANG; YI, JIANG y YI, JIANG: «A simple method, the history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials». *Measurement Science and Technology*, 1999, **10(3)**, pp. 201–205. ISSN 0957-0233, 1361-6501. doi: 10.1088/0957-0233/10/3/015.
- ZALBA, B.: «Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase». *Procedimiento experimental. . Ph.D. Thesis, University of Zaragoza (Spain).*, 2002.
- ZALBA, BELÉN; MARÍN, JOSÉ M.; CABEZA, LUISA F. y MEHLING, HARALD: «Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications». *Applied Thermal Engineering*, 2003, **23(3)**, pp. 251–283. ISSN 13594311. doi: 10.1016/S1359-4311(02)00192-8.
- : «Free-cooling of buildings with phase change materials». *International Journal of Refrigeration*, 2004, **27(8)**, pp. 839–849. ISSN 0140-7007. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.03.015.
- ZHANG, MENG; MEDINA, MARIO A. y KING, JENNIFER B.: «Development of a thermally enhanced frame wall with phase-change materials for on-peak air conditioning demand reduction and energy savings in residential buildings». *International Journal of Energy Research*, 2005, **29(9)**, p. 795–809. ISSN 1099-114X. doi: 10.1002/er.1082.
- ZHANG, YINPING; ZHOU, GUOBING; LIN, KUNPING; ZHANG, QUNLI y DI, HONGFA: «Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook». *Building and Environment*, 2007, **42(6)**, pp. 2197–2209. ISSN 0360-1323. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.07.023.
- ZHANG, Y.P.; LIN, K.P.; YANG, R.; DI, H.F. y JIANG, Y.: «Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy



- efficient buildings». *Energy and Buildings*, 2006, **38(10)**, pp. 1262–1269. ISSN 0378-7788. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.02.009.
- ZHAO, C.Y. y ZHANG, G.H.: «Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15(8)**, pp. 3813–3832. ISSN 1364-0321. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.019.
- ZHOU, D.; ZHAO, C.Y. y TIAN, Y.: «Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications». *Applied Energy*, 2012, **92(0)**, pp. 593–605. ISSN 0306-2619. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.025.
- ÖZONUR, Y.; MAZMAN, M.; PAKSOY, H. Ö. y EVLIYA, H.: «Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material». *International Journal of Energy Research*, 2006, **30(10)**, p. 741–749. ISSN 1099-114X. doi: 10.1002/er.1177.